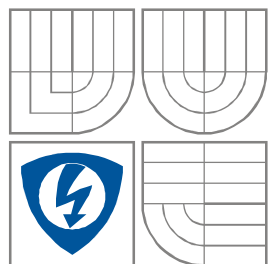


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANTÉNY S KRYTY Z METAMATERIÁLŮ

ANTENNAS WITH METAMATERIAL RADOMES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Lukáš Rulíšek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Lukáš Rulíšek

ID: 77798

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Antény s kryty z metamateriálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Detailně se seznámte s problematikou tzv. metamateriálů a popište typické představitele těchto struktur. Vyberte metamateriál, který by se dal aplikovat jako anténní kryt, fokusující vyzařovanou vlnu do úzkého anténního svazku. Vybranou vrstvu metamateriálu namodelujte.

Metamateriálovou vrstvu použijte jako kryt antény. Anténní strukturu optimalizujte pro pracovní kmitočet 5,9 GHz. Optimalizovanou anténní strukturu vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ENGHETA, N., ZIOLKOWSKI, R.W. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. Hoboken: J. Wiley and Sons, 2006.

[2] HORÁK, J., RAIDÁ, Z. Influence of EBG structures on the far-field pattern of patch antennas. Radioengineering, 2009, vol. 18, no. 2, p. 223-229.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Lukáš Rulíšek
Bytem: 9. května 17, Ruda nad Moravou, 789 63
Narozen/a (datum a místo): 28. června 1985 v Šumperku

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Antény s kryty z metamateriálů

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

V této práci se zabývám modelováním krytu z Meta-materiálu pro Dipólovou anténu. Ten to kryt z Meta-materiálu má zlepšit vlastnosti Dipólové antény. Pro tuto simulaci byl zvolen komerční program COMSOL Multiphysics.

KLÍČOVÁ SLOVA

Meta-materiál, COMSOL Multiphysics, CST Microwave Studio, analýza, činitel odrazu s_{11} .

ABSTRACT

In this work I am talking about modeling cover from meta-material for di-pole antenna. This meta-material cover should improve performance/properties of di-pole antenna. For the simulation is used comercial COMSOL Multiphysics program.

KEYWORDS

Meta-material, COMSOL Multiphysics, CST Microwave Studio , analyse, reflection coeicient s_{11}

Bibliografická citace

RULÍŠEK, L. *Antény s kryty z metamateriálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 39 s. Bakalářská Práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Dipólová anténa s krytem z Meta-materiálu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků.....	2
1 Úvod.....	4
2 Meta-materiály.....	4
2.1 Základní vlastnosti meta-materiálů.....	5
2.1.1 Záporná permitivita.....	5
2.1.2 Záporná permeabilita.....	6
2.1.3 Záporný index lomu.....	8
2.2 Meta-materiály v radiokomunikaci.....	9
2.2.1 Dvouvrstvý fázový kompenzátor.....	9
3. Rezonanční meta-povrch pro jedno pásmové a více pásmové dipólové antény	10
3.1 Vývoj zdokonalování plošných antén.....	10
3.2 Konstrukce buněk meta-materiálu.....	10
4. Analýzy buňky.....	14
4.1 Analýza dvojrozměrné buňky.....	14
4.2 Analýza trojrozměrné buňky.....	15
4.3 Analýza trojrozměrné buňky s periodickými podmínkami.....	18
4.4 Analýzy buňky pro šířku dielektrika 1.54mm.....	20
4.5 Analýzy buňky s permitivitou $\epsilon_r = 2,17$	22
5 Přizpůsobení buňky meta-materiálu	24
5.1 Analýza buňky s šířkou čar 0.381mm.....	25
5.2 Analýza buňky s šířkou čar 0.508mm.....	26
5.3 Analýza buňky s šířkou čar 0.513mm.....	27
5.4 Analýza buňky s šířkou čar 0.4699mm.....	29
6 Ověření Analýza buněk	31
6.1 Nastavení CST Microwave Studio.....	31
6.2 Výsledky simulací v CST Microwave Studio a porovnání s COMSOL Multiphysics.....	32
.....	34
7. Závěr.....	35
Literatura.....	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Princip soustavy paralelních drátků.....	5
Obr. 2.2: Typy štěrbinových rezonátorů [4]	6
Obr. 2.3: Graf zobrazující zápornou permeabilitu [4].....	7
Obr. 2.4: Uspořádání štěrbinových rezonátorů [4].....	7
Obr. 2.5: Ukázka kombinace pole drátků a štěrbinových rezonátorů[5].....	8
Obr. 2.6: Lom v běžném prostředí (vlevo) a lom v meta-materiálu (vpravo) [5].....	8
Obr. 2.7: Dvouvrstvý fázový kompenzátor.....	9
Obr. 3.1: Parametry buňky. Šířka všech mezer a čar je 0.254mm, $d_1 = 7,366\text{mm}$, $d_2 = 1,944\text{mm}$, $d_3 = 4,318\text{mm}$, $l_1 = 3,81\text{mm}$, $l_2 = 1,778\text{mm}$, $l_3 = 3,556\text{mm}$, $r_1 = 2,794\text{mm}$, $r_2 = 1,778\text{mm}$. (a) pohled zepředu. (b) pohled shora [1].....	11
Obr. 3.2: Vlastnosti přenosu meta-povrchu ve vlnovodu [1].....	11
Obr. 3.3: Konfigurace dipólové antény, která je tvořena 4x2 buňkami. Rozměry jsou: $l_x = 0,31\lambda_0$, $l_y = 0,58\lambda_0$ a $l_z = 0,25\lambda_0$ [1].....	12
Obr. 3.4: Závislost S_{11} na počtu použitých buněk [1].....	13
Obr. 3.5: Rezonanční frekvence v závislosti na počtu buněk [1].....	13
Obr. 4.1: 2D zobrazení buňky meta-materiálu.....	14
Obr. 4.2: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} 2D meta-materiálu.....	15
Obr. 4.3: 3D model buňky meta-materiálu.....	16
Obr. 4.4: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} jedné buňky meta-materiálu.....	17
Obr. 4.5: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} dvou buněk 3D meta-materiálu.....	17
Obr. 4.6: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro čtveřici buněk 3D meta-materiálu.....	18
Obr. 4.7: 3D model buňky meta-materiálu s periodickými podmínkami.....	19
Obr. 4.8: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku s použitím periodických podmínek.....	19
Obr. 4.9: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky umístěné nad sebou s použitím periodických podmínek.....	20
Obr. 4.10: 3D model buňky meta-materiálu s šířkou 1.54.....	20
Obr. 4.11: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku.....	21
Obr. 4.12: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky.....	21
Obr. 4.13: 3D model buňky meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$...22	22
Obr. 4.14: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro buňku meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$	23
Obr. 4.15: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$	23
Obr. 5.1: Ukázka buňky meta-materiálu bez dielektrické vrstvy a s dielektrickou vrstvou....	24
Obr. 5.2: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu (s šířkou čar 0.381mm)...	25
Obr. 5.3: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika(s šířkou čar 0.508mm).....	26
Obr. 5.4: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.508mm).....	27
Obr. 5.5: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika (s šířkou čar 0.513mm).....	28
Obr. 5.6: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.513mm).....	28

Obr. 5.7: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika (s šířkou čar 0.4699mm).....	29
Obr. 5.8: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.4699mm).....	30
Obr. 6.1: Buňka meta-materiálu ve vlnovodu v programu CST Microwave Studio.	31
Obr. 6.2: Simulace buňky v CST s rozměry z kapitoly 5.1.	32
Obr. 6.3 Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoly 5.2.	33
Obr. 6.4: Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoly 5.3.	33
Obr. 6.5: Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoli 5.4.....	34

1 Úvod

V dnešní době mobilních telefonů, bezdrátových sítí a internetu je potřeba zlepšovat vlastnosti multifunkčních antén za pomoci speciálních materiálů (meta-materiálů) a jiných nových prvků součástek pro vysílání a přijímání signálů v různých pásmech elektromagnetického spektra. Velkou roli na zlepšení výkonnosti těchto systémů hrají použité materiály. Výzkum nových elektromagnetických materiálů za použití nových metod (nanotechnologií) nás přivedl k výrobě umělých (kompozitních) materiálů. Hovoříme o takzvaných meta-materiálech, které vykazují nové vlastnosti, jež se v přírodních materiálech nevyskytují, a to právě z pohledu elektromagnetických vln.

2 Meta-materiály

Vývoj mobilních telefonů a bezdrátových sítí si žádá stále větší nároky na zlepšování multifunkčních antén, speciálních materiálů a dalších nových součástek a prvků pro zajištění vysílání a příjem signálu v požadovaných pásmech elektromagnetického spektra. Další prvky, které mohou zvyšovat výkon těchto zařízení, jsou materiály. Právě výzkum nových elektromagnetických materiálů zaujal v poslední době řadu odborníků, zabývajících se použitím mikrostruktur umělých materiálů a nanotechnologií.

Tyto materiály pak nazýváme meta-materiály. Vyznačují se tím, že mají vlastnosti, které se nenacházejí v přírodních materiálech. Jedná se hlavně o rozptyl, vyzařování a vedení elektromagnetických vln.

Meta-materiál ovlivňuje elektromagnetické vlny, které mají strukturální znaky menší než vlnová délka elektromagnetického záření. Například, pokud se meta-materiál chová jako homogenní materiál, přesně popsán efektivní index lomu, musí být jeho funkce mnohem menší než vlnová délka. Pro viditelné světlo, kde uprostřed spektra má vlnovou délku přibližně 560 nm (sluneční světlo), meta-materiál struktury jsou zpravidla poloviční velikosti nebo menší (<280 nm). Pro mikrovlnné záření, struktury je pouze v řádu několika centimetrů. Mikrovlnné frekvence meta-materiály jsou většinou syntetické, postavené jako pole elektricky vodivých prvků (např. smyčky z drátu), které mají vhodné indukční a kapacitní charakteristiky.

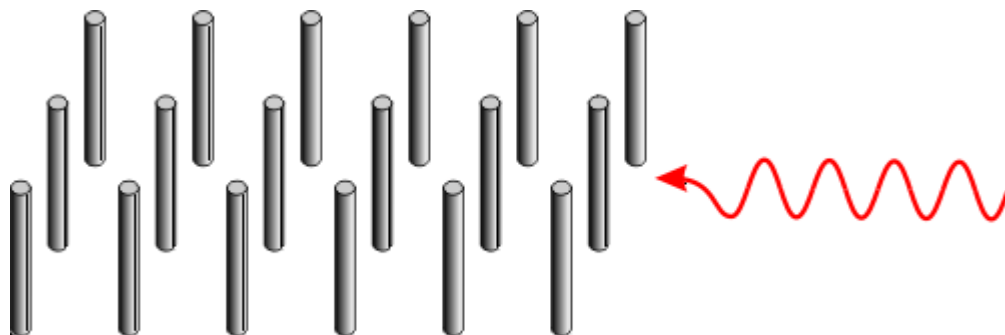
2.1 Základní vlastnosti meta-materiálů

Hlavní výhodou meta-materiálů jsou jejich vlastnosti, které se běžně v přírodě nevyskytují. To je způsobeno jejich uměle vytvořenou vnitřní strukturou, a právě díky tomu získávají nové či neobvyklé vlastnosti, jako například zápornou permitivitu, zápornou permeabilitu a záporný index lomu.

Nicméně zatím vyráběné meta-materiály dosahují těchto speciálních vlastností pouze za určitých vlnových délek. V ostatních vlnových délkách se chovají jako běžné materiály.

2.1.1 Záporná permitivita

Pokud v prostředí mříží vektory elektrické indukce D a intenzity elektrického pole E opačným směrem, tak se jedná o prostředí se zápornou permitivitou. Takové prostředí můžeme vytvořit pomocí soustavy paralelních drátků, které je zobrazeno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Princip soustavy paralelních drátků.

Potom bude permitivita určena vzorcem [4]

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega}, \quad (2.1)$$

kde ω_p a ω_0 jsou frekvence dané nastavením soustavou drátků, γ je útlum a ω je frekvence vlny, která dopadá na materiál. Ze vzorečku je patrné, že v blízkosti rezonance má permitivita reálnou i imaginární část. Reálná část ovšem může být pro některé frekvence i záporná.

Tudíž elektromagnetická vlna, která bude dopadat v oblasti rezonance, bude pohlcena a nebude dále tímto prostředím procházet.

2.1.2 Záporná permeabilita

Oproti prostředí se zápornou permitivitou, která se dá poměrně jednoduše vytvořit, je vytvoření prostředí se zápornou permeabilitou mnohem náročnější.

První takové navržené prostředí bylo v roce 1999 Johnem Pendrym. Skládalo se z mnoha opakujících se šterbinových rezonátorů. Šterbinový rezonátor se skládá ze dvou vodivých kroužků vytvořených například z mědi, které mají otvor (šterbinu) na opačné straně a oba kroužky jsou indukčně a kapacitně vázány. Ukázku typů šterbinových rezonátorů najdeme na obr. 2.2. Nejčastěji používaný typ se nachází vlevo.

Pokud dopadne elektromagnetická vlna kolmo na šterbinový rezonátor, tak v něm při rezonanci vybudí proud, který protéká kolem kroužků. Chování rezonátoru je podobné magnetickému dipólu, který má velmi intenzivní odezvu na magnetickou vlnu. Na protilehlých stranách šterbin se hromadí opačné elektrické náboje.

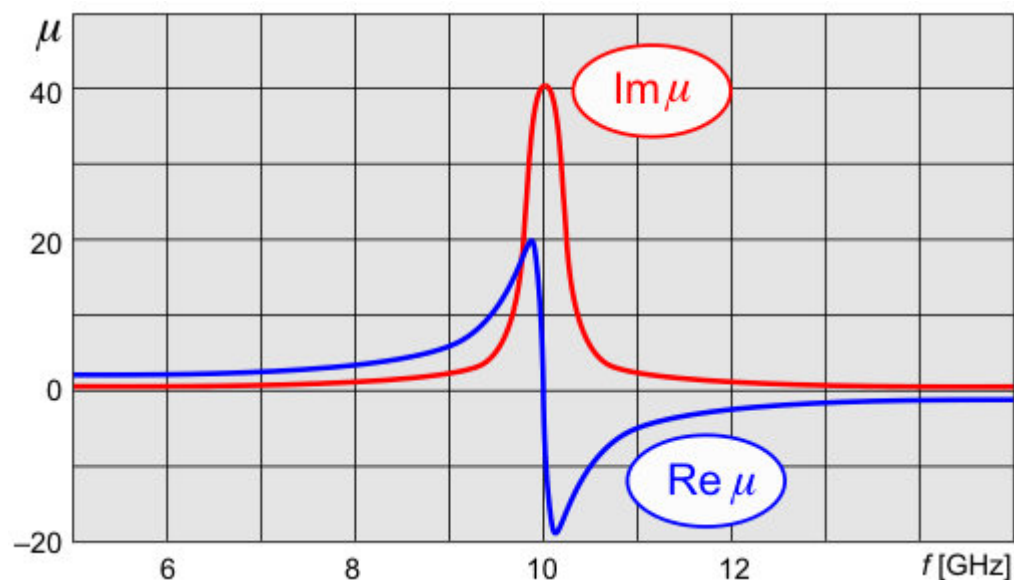


Obr. 2.2: Typy šterbinových rezonátorů [4] .

Soustava šterbinových rezonátorů má permeabilitu v okolí rezonance danu tímto vzorcem [4]:

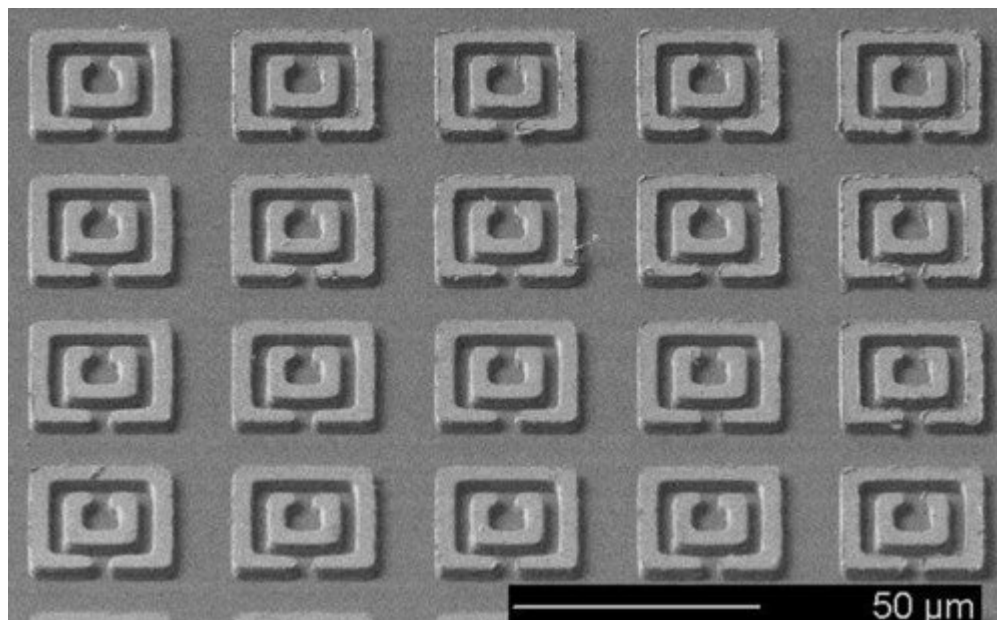
$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F \cdot \omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega}, \quad (2.2)$$

Reálná část má zápornou hodnotu v oblasti těsně nad rezonancí. Na obr. 2.3 je zobrazen graf ukazující zápornou permeabilitu.



Obr. 2.3: Graf zobrazující zápornou permeabilitu [4].

Existují dva hlavní způsoby uspořádání šterbinových rezonátorů. První způsob je zobrazen na obr. 2.4. Jedná se o uspořádání rezonátorů do dvourozměrných polí. Druhý způsob staví rezonátory do třírozměrných útvarů, které jsou podobné krystalům. Velikost rezonátorů ovlivňuje frekvence, při kterých bude rezonovat. Pokud je velikost rezonátoru centimetr či milimetr, pak dochází k rezonanci na rádiových vlnových délkách. Pokud ovšem je velikost rezonátoru kolem 50 mikrometrů, pak dochází k rezonanci v oblasti THz.



Obr. 2.4: Uspořádání šterbinových rezonátorů [4].

2.1.3 Záporný index lomu

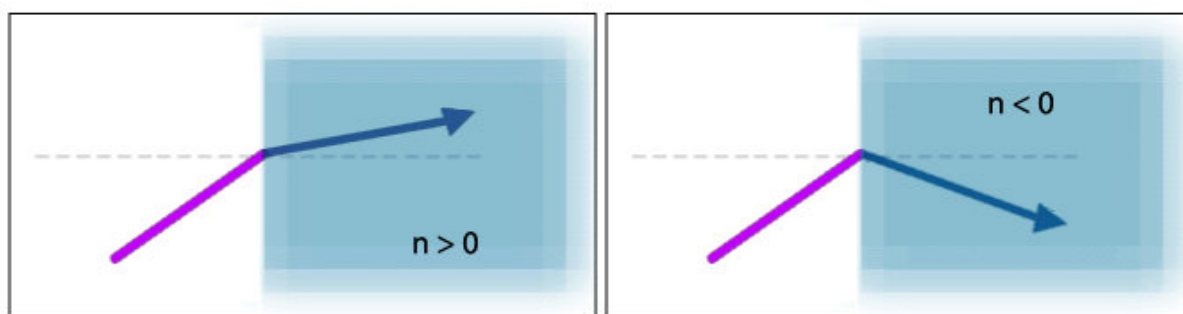
Prostředí, ve kterém je záporný index lomu, se vytváří spojením pole drátků se zápornou permitivitou (viz. 2.1.1) a polem štěrbinových rezonátorů se zápornou permeabilitou (viz. 2.1.2). Další podmínkou je, aby rezonance obou polí probíhaly na stejné frekvenci. Na obr. 2.5 je takové hybridní pole zobrazeno.

Pokud jsou odděleny pole elektrických a magnetických rezonátorů, pak je elektromagnetická vlna pohlcena. Ovšem pokud jsou zkombinovány, tak v oblasti záporného indexu lomu vznikne okno propustnosti a vlna tímto prostředím prochází.



Obr. 2.5: Ukázka kombinace pole drátků a štěrbinových rezonátorů[5].

Na obr. 2.6 vlevo je zobrazen lom v běžném prostředí, kde je kladný index lomu. Na tom samém obrázku vpravo je zobrazen lom v meta-materiálu, který má záporný index lomu.



Obr. 2.6: Lom v běžném prostředí (vlevo) a lom v meta-materiálu (vpravo) [5].

2.2 Meta-materiály v radiokomunikaci

Meta-materiály přináší nové možnosti řešení pro navrhování budoucích elektromagnetických zařízení, mezi které patří multifunkční antény a vysokofrekvenční systémy.

Je tomu teprve pár let co se objevil zájem využívat umělé struktury pro výrobu kompozitních materiálů. Ty mají stejné nebo lepší vlastnosti oproti běžně použitým materiálům, popřípadě i nové fyzikální vlastnosti, které se v přírodě nenacházejí.

Mezi tyto materiály, které se dnes používají, patří strukturované materiály s přerušovaným elektromagnetickým pásmem EBG (Electromagnetic Band Gap), dvojitě negativní materiály DNG (Double Negative Material). To jsou umělé materiály, které mají současně záporné permitivity a permeability.

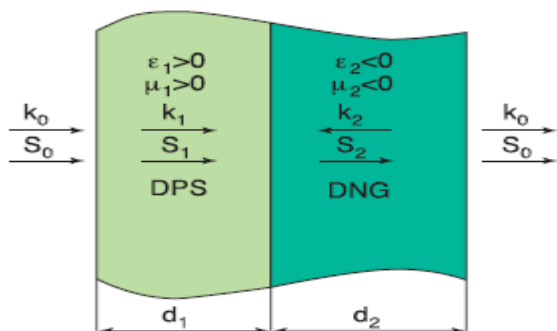
Prostředí, které má záporné hodnoty permitivity a permeability se nazývá prostředí se zpětnou vlnou (BW – Backward Wave medium). To je dáno tím, že rovinná elektromagnetická vlna v tomto prostředí má opačně směřován Poyntingův vektor S a také vlnový vektor k .

2.2.1 Dvouvrstvý fázový kompenzátor

Díky materiálům se zápornými parametry je možnost stavět zajímavé prvky. Může si například sestavit i fázový kompenzátor.

Na obr. 2.7 je ukázáno, jak se dá takový fázový kompenzátor realizovat. Skládá se ze dvou vrstev, z nichž jedna je tvořena bezztrátovým obvyklým prostředím s kladnou permitivitou a permeabilitou a ta druhá je tvořena bezztrátovým prostředím se zápornou permitivitou a permeabilitou.

Ve vrstvě s normálním prostředím je směr Poyntingova vektoru S_1 rovnoběžný s vlnovým vektorem k_1 . Co se týče prostředí se zápornými hodnotami, tak tam je vektor S_2 opačný oproti vektoru k_2 . Pokud tedy vhodně zvolíme poměr délek d_1 a d_2 , pak můžeme získat stejnou fázi, která je na vstupní levé straně, i na pravé výstupní straně.



Obr. 2.7: Dvouvrstvý fázový kompenzátor.

3. Rezonanční meta-povrch pro jedno pásmové a více pásmové dipólové antény

V této kapitole se zabýváme článkem [1], který bude stručně popsán a z něhož budeme dále vycházet při návrhu antény s krytem z meta-materiálu. Všechny obrázky byly převzaty z článku [1].

3.1 Vývoj zdokonalování plošných antén.

Na začátku roku 1980 byla zdokumentována rezonanční metoda, která vylepšovala zisk plošných antén. Tato metoda byla založena na přidání krycí vrstvy s permitivitou nebo permeabilitou mnohem větší než 1. Vhodným výběrem tloušťky této vrstvy a pozicí dipólu mohl být realizován relativně velký zisk. Nicméně tato konfigurace vyžadovala poměrně silnou vrstvu kolem $\lambda/2$. To vede k celkové tloušťce, která je ve většině případů nekompatibilní s návrhem anténního obvodu. Efektivita vyzařování je obvykle 60 %.

Další metoda zvýšení výkonu, která byla navržena relativně nedávno, využívá přerušovaných elektromagnetických pásem (EBG – Electromagnetic Band Gap). EBG pole se skládá z dielektrických prvků, které obsahují skupiny propustných a nepropustných částí. Tloušťka EBG struktury je $\lambda/2$ a efektivita vyzařování je kolem 80 %.

Před několika lety se začalo experimentovat s využitím meta-materiálu pro tvorbu rovinných (planárních) antén. Ty mají díky tomu poměrně malou tloušťku, menší než $\lambda_0/4$ a vysoký vysílací výkon kolem 80 %.

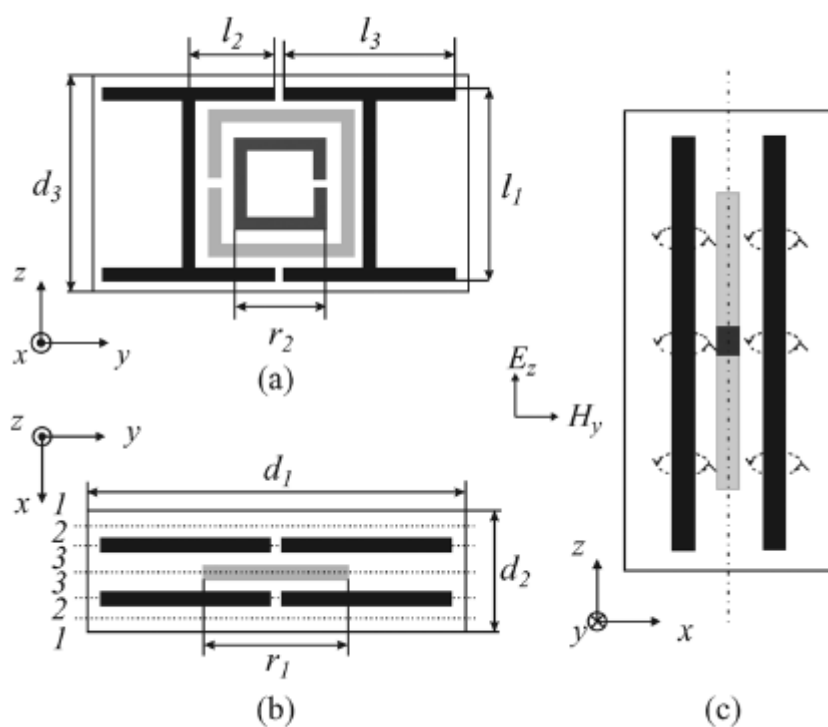
3.2 Konstrukce buněk meta-materiálu

K vytvoření prostředí se zápornou permitivitou a permeabilitou stačí, jak už víme z 2.1.3, zkombinovat pole drátků a štěrbinových rezonátorů. Nicméně jak toto pole buněk vytvořit? Na jeho vytvoření byl použit speciální materiál RT/Duroid 5880. Ten má malou ztrátu dielektrika charakterizovanou parametrem $\epsilon_r = 2,2$, ztrátový tangens $\tan\delta = 0,0009$, tloušťku 0,254 mm a měděné opláštění 70 μm na obou stranách.

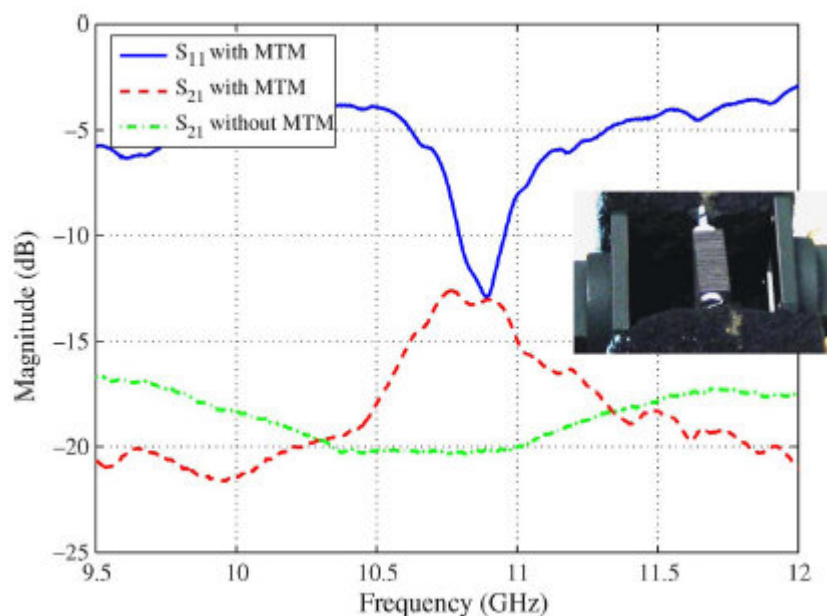
Na obr. 3.1 jsou uvedeny jednotlivé vrstvy buňky a její rozměry. Celá buňka se skládá z tří různých typů vrstev, které jsou požadovány k vytvoření meta-povrchu buňky. Na obr. 3.1 vidíme, jak se jednotlivé vrstvy skládají na sebe. Z článku [1] také vyplývá, že mezi jednotlivými rozměry by měl být zachován poměr stran k šířce čáry.

Vlastnosti přenosu a odrazu vytvořeného meta-povrchu byly testovány v budícím vlnovodu. Pole, které se skládalo z 12x4 buněk, bylo umístěno mezi dva vlnovody WR-75.

Naměřené hodnoty jsou na obr. 3.2. Hlavní význam má porovnání hodnoty parametru s_{21} při použití meta-materiálu a běžného materiálu. Zvýšení o 8 dB je dosaženo kolem rezonanční frekvence $f = 10,9$ GHz.

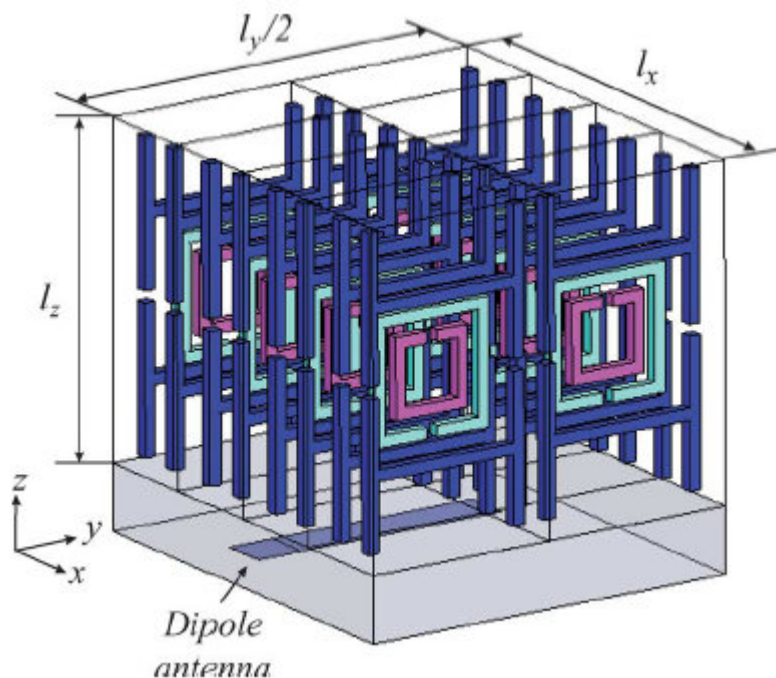


Obr. 3.1: Parametry buňky. Šířka všech mezer a čar je 0.254mm, $d_1 = 7,366\text{mm}$, $d_2 = 1,944\text{mm}$, $d_3 = 4,318\text{mm}$, $l_1 = 3,81\text{mm}$, $l_2 = 1,778\text{mm}$, $l_3 = 3,556\text{mm}$, $r_1 = 2,794\text{mm}$, $r_2 = 1,778\text{mm}$. (a) pohled zepředu. (b) pohled shora [1].



Obr. 3.2: Vlastnosti přenosu meta-povrchu ve vlnovodu [1].

Na obr. 3.3 je znázorněno pole buněk, které tvoří kryt dipólové antény. Výška buňky (l_z) je 7,366 mm, což je $\lambda_0/4$, kde λ_0 je vlnová délka navržená pro frekvenci $f = 11,15$ GHz. Díky správným rozměrům dipólu, které byly optimalizovány simulací, a jeho správné vložení mezi dielektrickou desku a meta-materiál, bylo dosaženo navýšení zisku. Dipólová anténa byla napájena ideálním portem, při tom bylo dosaženo impedance $Z = 51,56 \Omega$.

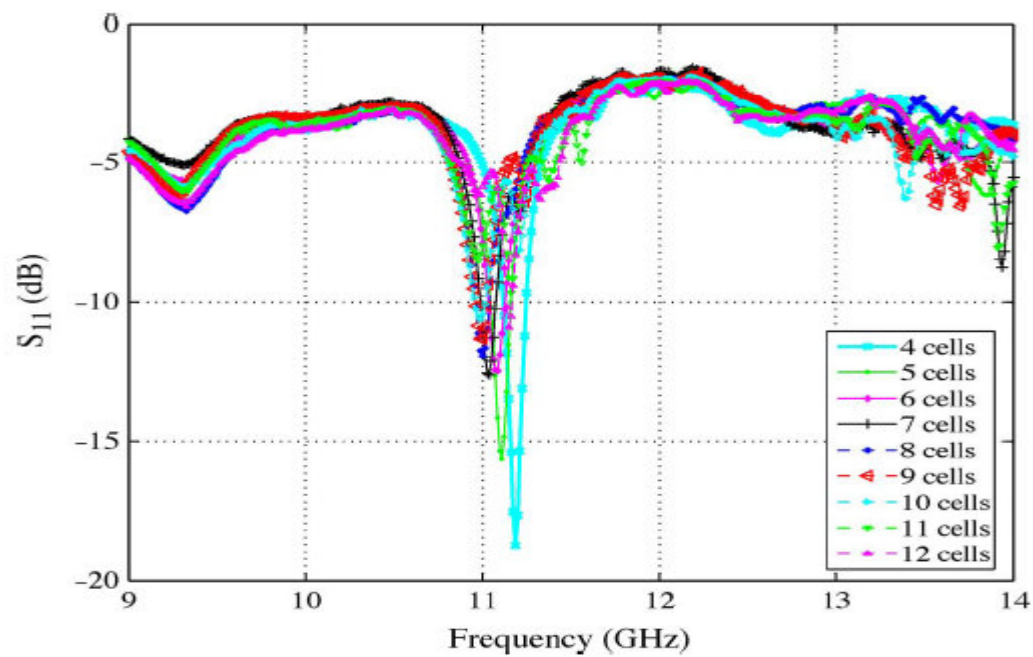


Obr. 3.3: Konfigurace dipólové antény, která je tvořena 4x2 buňkami. Rozměry jsou:

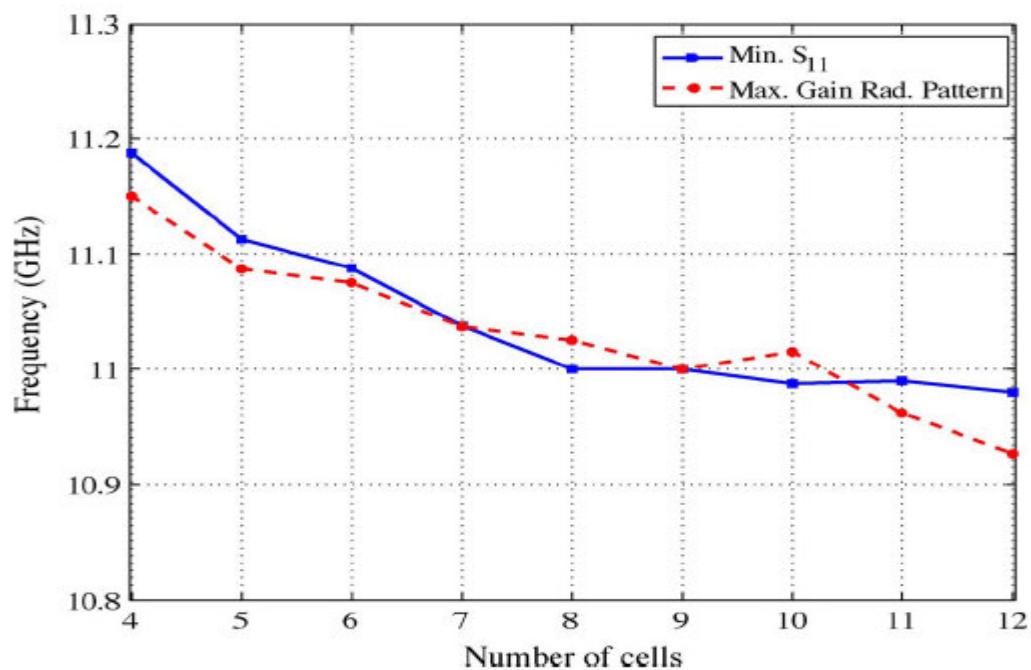
$$l_x = 0,31\lambda_0, l_y = 0,58\lambda_0 \text{ a } l_z = 0,25\lambda_0 [1].$$

Činitel odrazu S_{11} je závislý na počtu buněk, což je ukázáno na obr. 3.4. Při počtu 4 buněk je dosaženo největšího činitele odrazu $S_{11} = 19$ dB. Při přidání dalších dvou buněk se činitel odrazu zmenší na 12 dB. Při dalším navyšování počtu buněk se již tento parametr prakticky nemění.

Na dalším Obr. 3.5 je zobrazena závislost rezonanční frekvence na počtu buněk. Celkový frekvenční rozsah pro 4 – 12 buněk je 11,19 GHz až 10,9 GHz. S rostoucím počtem buněk se snižuje rezonanční frekvence. Od počtu osmi buněk je rezonanční kmitočet takřka konstantní.



Obr. 3.4: Závislost S_{11} na počtu použitých buněk [1].



Obr. 3.5: Rezonanční frekvence v závislosti na počtu buněk [1].

4. Analýzy buňky

V této kapitole se budeme zabývat analýzou buněk meta-materiálu ve dvourozměrném a třírozměrném prostoru. Tyto analýzy byly provedeny v programu COMSOL Multiphysics.

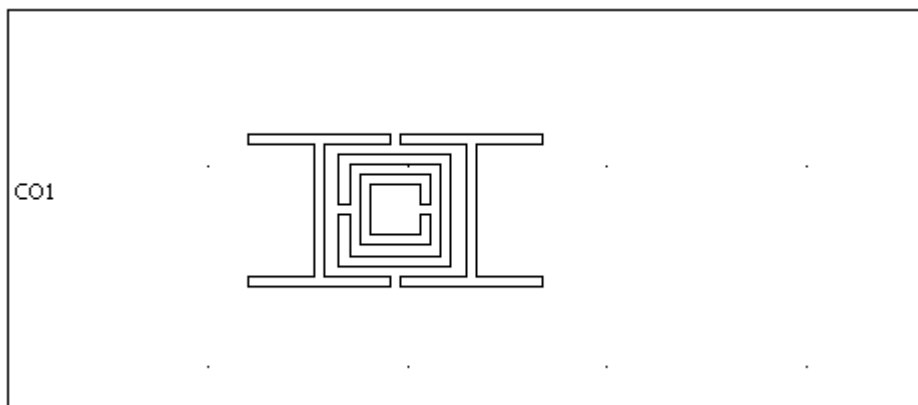
4.1 Analýza dvojrozměrné buňky

V již zmíněném programu COMSOL Multiphysics se dvourozměrný model nastavuje v hlavním menu (*Model navigator*). V tomto menu nastavíme *RF Module* → *In-Plane Waves* → *TE Waves* → *Harmonic propagation*. Do políčka *Element* nastavíme *Lagrange-Quadratic* a potvrdíme. V grafickém rozhraní tohoto programu nakreslíme požadovaný tvar daného meta-materiálu, jehož rozměry jsou uvedeny v popisku obrázku obr. 3.1.

V možnostech *Physics* vybereme záložku *Boundary Settings*, sloužící k definování okrajových podmínek. Dále je potřeba v listboxu *Boundary Selection* označit levý okraj, který nastavíme jako *Port*, jenž bude zdrojem elektromagnetické vlny. Dolní a horní okraj nastavíme jako *Perfect Magnetic Conductor*. Pravý okraj nastavíme jako *Scatteringboundary condition*. Strukturu meta-materiálu nastavíme jako *Perfect Electric Conductor*.

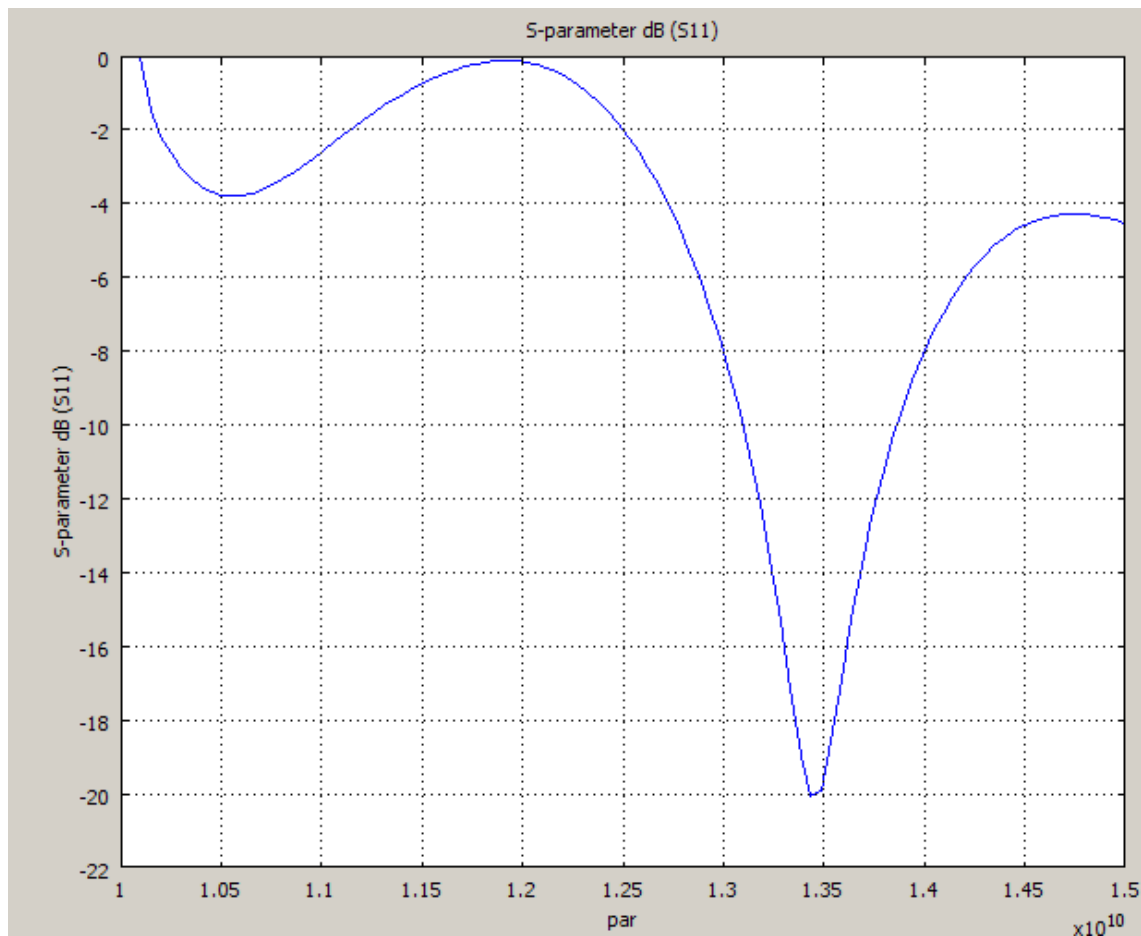
V dalším kroku musíme pomocí parametru nastavit rozsah frekvenční analýzy. Toto nastavení provedeme v menu *Scalar Variables* do pole *nu_rfw*, kde napíšeme název našeho parametru. Tento parametr nastavíme v menu *Solve* → *Solver Parameter*.

V tomto okně se nachází záložka *Parameter* a vněm do kolonky *Name Of Parameter* napíšeme název našeho parametru (v našem případě “*par*”). Do další kolonky *List Of Parameter* vložíme *linspace(10e9,15e9,150)*. Tento dvourozměrný model je zobrazen na obr. 4.1.



Obr. 4.1: 2D zobrazení buňky meta-materiálu.

Tento 2D model meta-materiálu dosáhl největšího činitele odrazu s_{11} při frekvenci 13,4 GHz tento výsledek je zobrazen na grafu obr 4.2. Analýza byla provedena ve frekvenčním rozsahu od 10 GHz do 15 GHz.

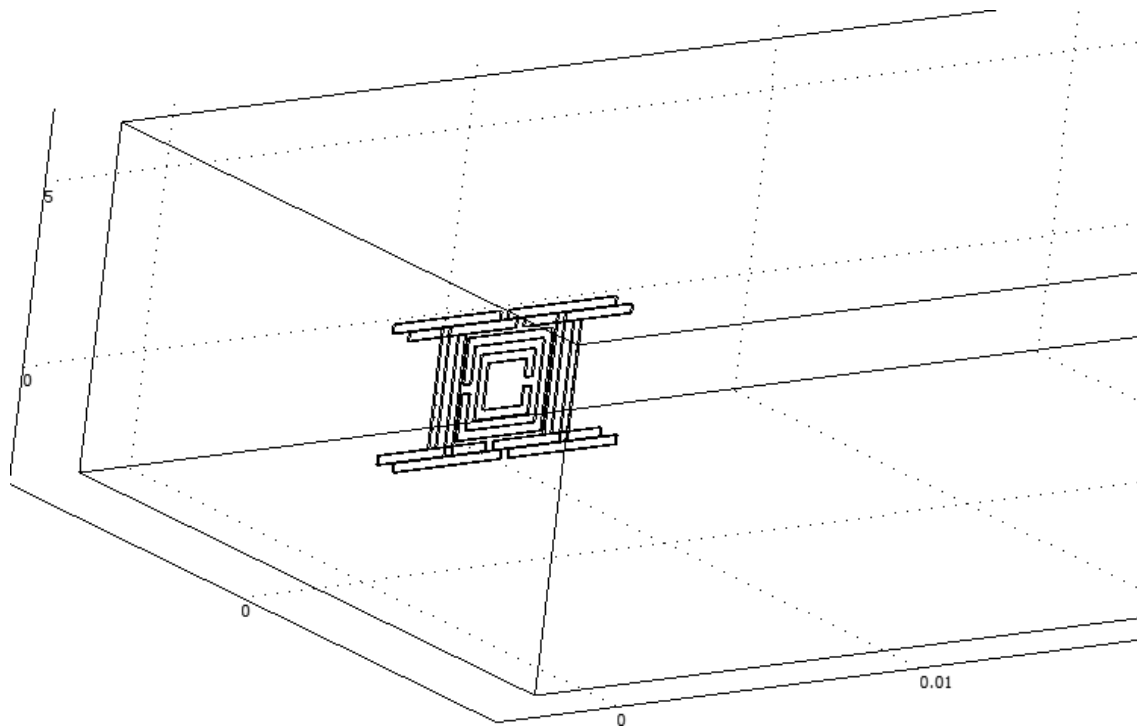


Obr. 4.2: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} 2D meta-materiálu.

4.2 Analýza trojrozměrné buňky

V prvním kroku nastavíme *Space Dimension* na 3D a v RF Module → *Electromagnetic Waves*. V dalším kroku z nabídky vybereme *RF Module* → *Electromagnetic Waves* → *Harmonic Propagation*. Políčka *Element* necháme nastavené na *Lagrange-Quadratic*.

Poté nakreslíme v grafickém rozhraní požadovaný tvar daného meta-materiálu nyní již jako 3D objekt, jehož rozměry jsou uvedeny obr. 3.1. Takto nakreslená struktura je zobrazena na obr. 4.3.



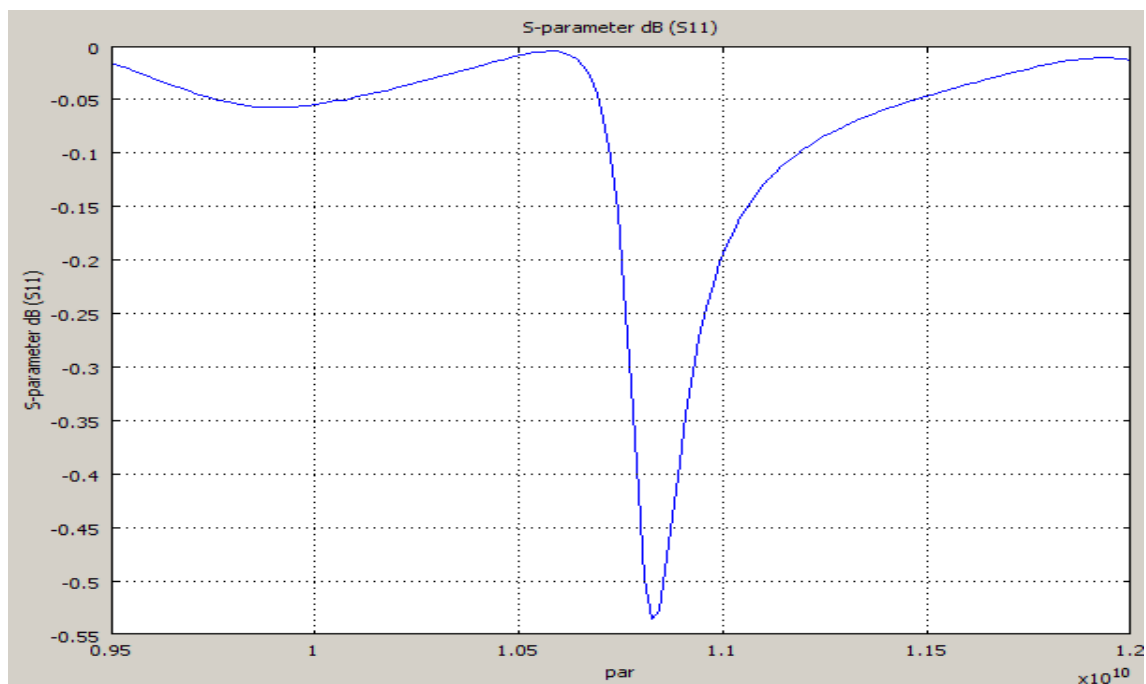
Obr. 4.3: 3D model buňky meta-materiálu.

Stejně jako u 2D rozhraní musíme i ve 3D nastavit okrajové podmínky. V menu vybereme položku *Physic*→*Boundary Settings* dále v listboxu *Boundary selection* označíme přední stěnu, kterou nastavíme jako Port v listboxu *Boundary Condition* a zaškrtneme pole *Wave Excitation at this port*. Poté se přepneme na záložku *Port*, kde v *Mode specification* nastavíme *Rectangular*. Tím se stane naše přední strana stále zdrojem TE vlny. Zadní stěnu nastavíme totožným způsobem s tím rozdílem, že nezaškrtneme pole *Wave Excitation*, čímž se ze zadní strany stane detektor S-parametrů.

Zbytek struktury nastavíme v listboxu *Boundary Condition* na *Perfekt Electric Conductor*.

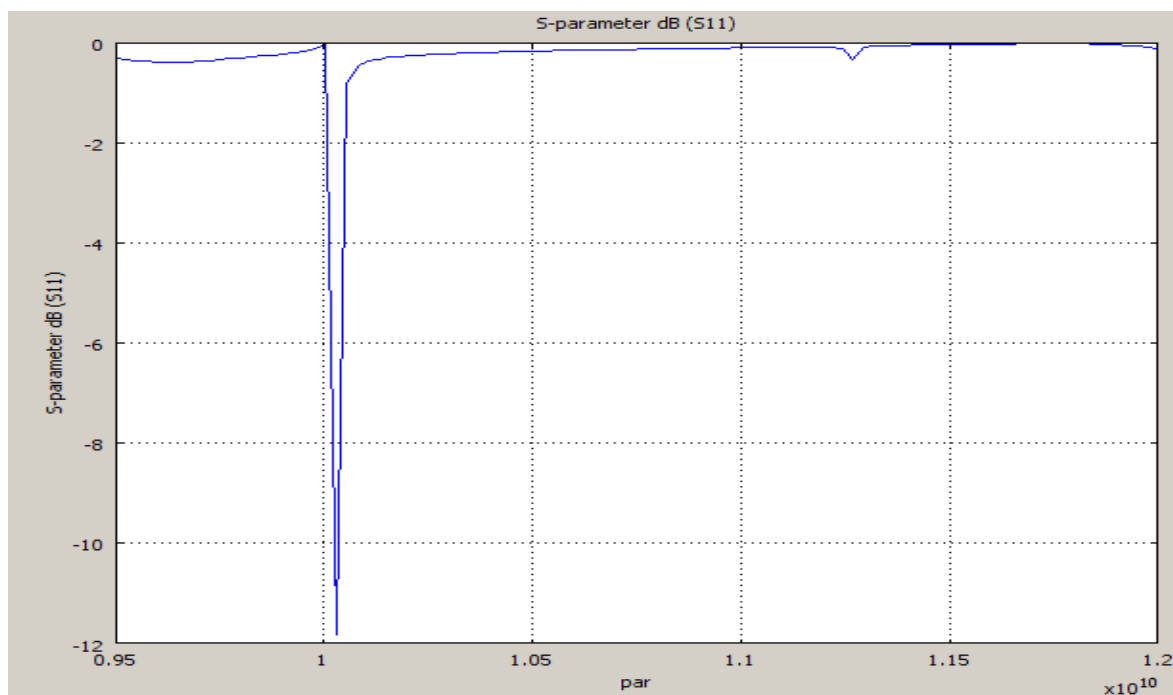
Dále nastavíme parametrické rozmítání stejně jako tomu bylo v kapitole 4.1.

První simulace byla provedena ve vlnovodu WR-75 (9,5mm x 19mm), kde byla simulována jedna buňka bez s dielektrické vrstvy. Výsledek této simulace je zobrazen na obr. 4.4. Na obrázku je vidět parametr s_{11} , který je největší při frekvenci $f = 10,8$ GHz, což odpovídá teoretickým předpokladům, jen jeho hodnota je nízká 0,54dB.



Obr. 4.4: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} jedné buňky meta-materiálu.

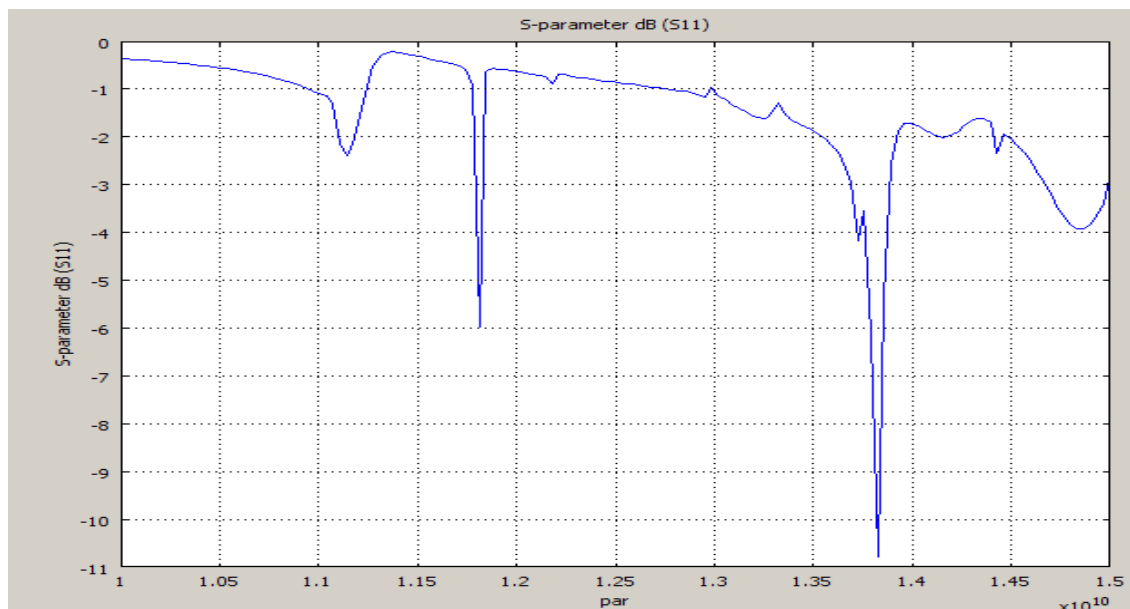
Při zachování stejného nastavení simulace a přidání další buňky, která byla umístěna vedle původní, bylo docíleno větší hodnoty činitele odrazu $s_{11} = 11,9$ dB a posunutí rezonanční frekvence na hodnotu $f = 10,1$ GHz. Tyto vlastnosti jsou zobrazeny na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} dvou buněk 3D meta-materiálu.

Při simulaci čtveřice buněk uspořádané do matice 2x2 se rezonanční frekvence posunula na hodnotu $f = 13,7$ GHz z původních $f = 10,1$ GHz, která byla dosazena při použití dvou buněk.

Graf simulace pro čtyři buňky je zobrazen na Obr. 4.6



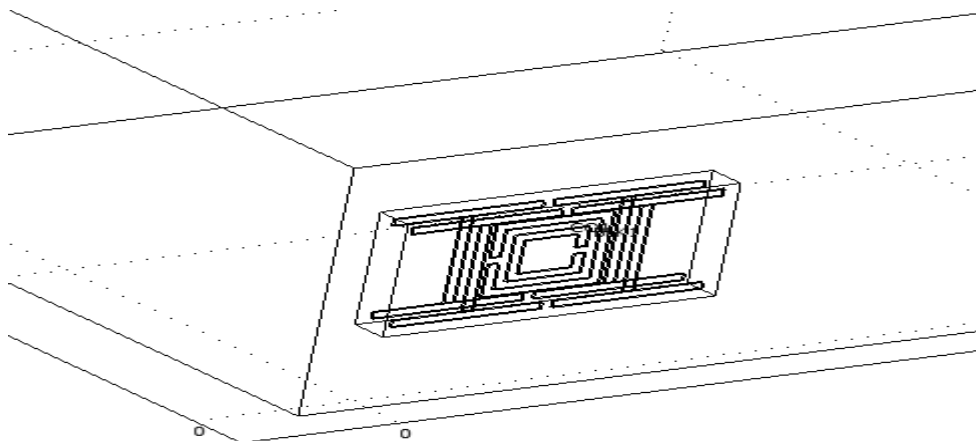
Obr. 4.6: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro čtveřici buněk 3D meta-materiálu.

4.3 Analýza trojrozměrné buňky s periodickými podmínkami

Pro analýzu s periodickými podmínkami zachováme stejná nastavení jako v předchozích simulacích, jen kolem naší struktury nakreslíme kvádr. U tohoto kvádru nastavíme okrajové podmínky v menu *Physic*→*Boundary Settings* dále v listboxu vybere jednotlivé strany tohoto kvádru a nastavíme je pomocí *Boundary Condition* na *Continuity*. Také v menu *Physics*→*Properties* musíme nastavit *Divergence condition* na *On*.

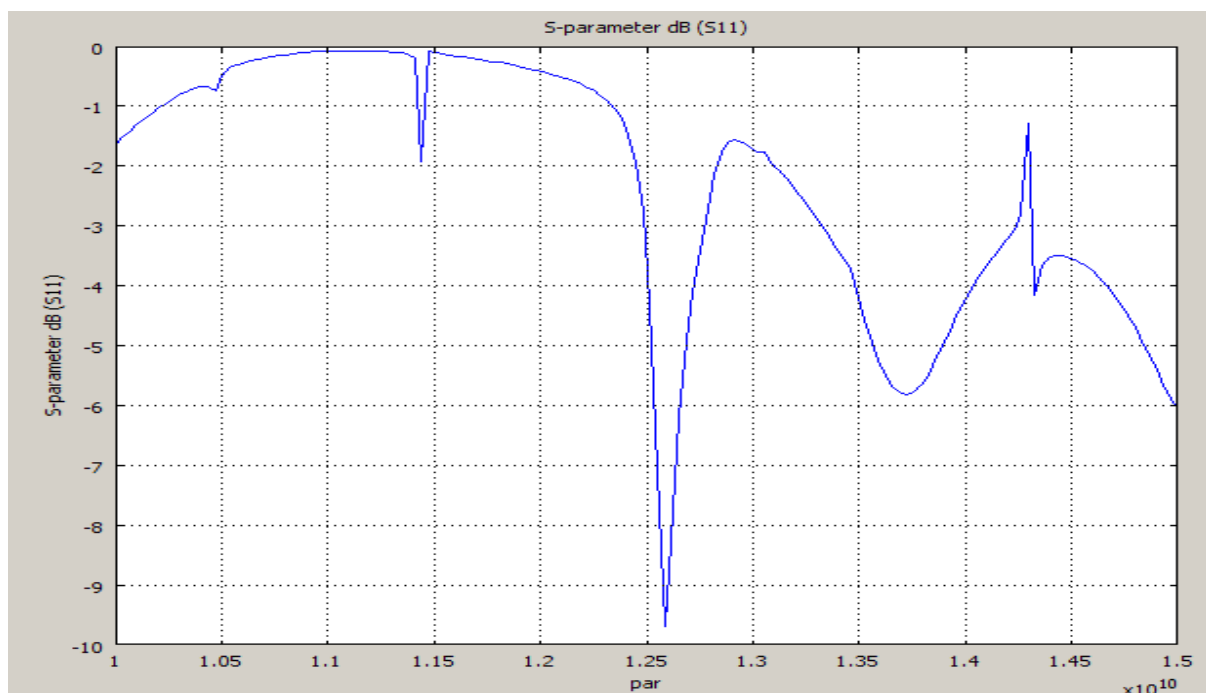
Směr šíření buňky nastavíme v *Physics*→*Periodic Conditions*→*Periodic Boundary Conditions* zde vybere stranu kvádru od které chceme aby se naše buňka periodicky opakovala. Tato strana je jako počátek. Do prvního řádku sloupce *Expression* napíšeme *psi*, sloupec *Constraint name* se vyplní automaticky. Pro druhý řádek zaškrtneme pole *Vector element constraint* a do toho to řádku napíšeme *tEx tEy tEz*. Dále v záložce *Destination* v listboxu vybereme stranu ve směru, kterým chceme, aby se naše buňka periodicky opakovala. Tato strana je vždy protější stranou, strany počáteční.

Takto nakreslena buňka je zobrazena na obr. 4.7.

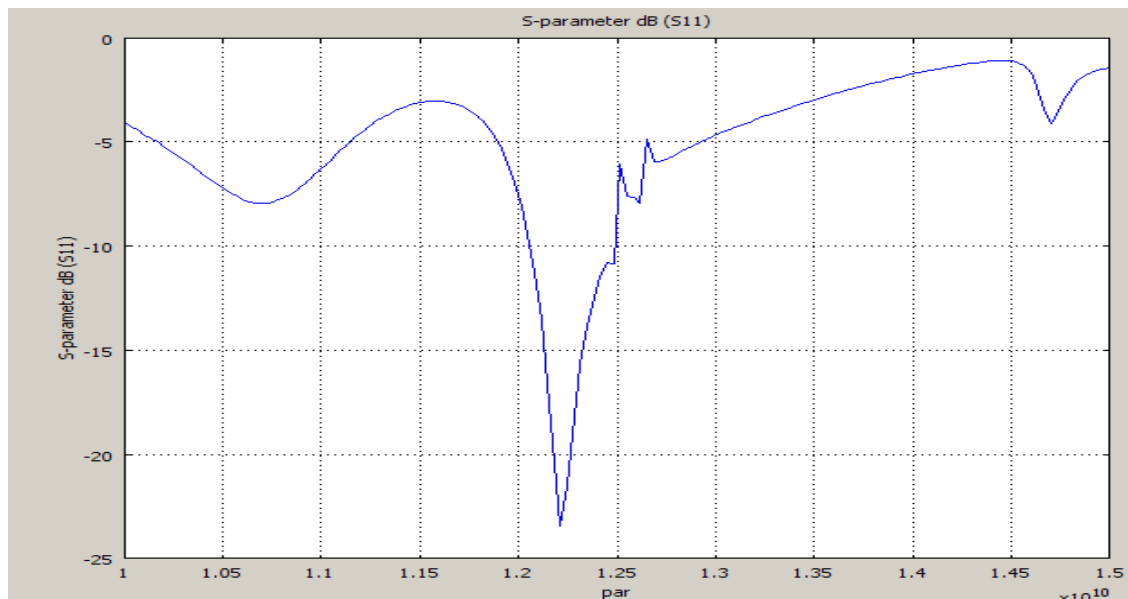


Obr. 4.7: 3D model buňky meta-materiálu s periodickými podmínkami.

Na obr. 4.8 vidíme, jak se projeví periodické opakování buňky na hodnotě činitele odrazu s_{11} který se zvýšil na 9,9 dB při frekvenci $f = 12,6$ GHz oproti jedné buňce, která dosáhla hodnoty 0,54 dB a frekvenci $f = 10,8$ GHz. Při umístění dvou buněk nad sebou a periodickém opakování těchto dvou buněk bylo dosaženo rezonanční frekvence okolo $f = 12,2$ GHz a hodnotě parametru $s_{11} = 23$ dB, což je dvojnásobně větší hodnota než při periodickém opakování jedné buňky (viz. Obr. 4.9).



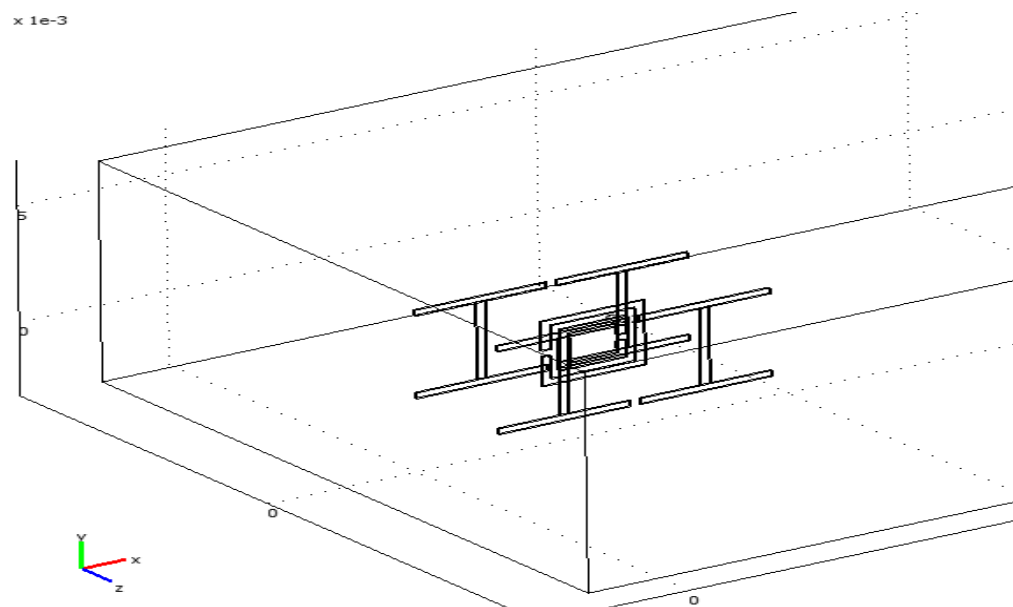
Obr. 4.8: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku s použitím periodických podmínek.



Obr. 4.9: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky umístěné nad sebou s použitím periodických podmínek.

4.4 Analýzy buňky pro šířku dielektrika 1.54mm

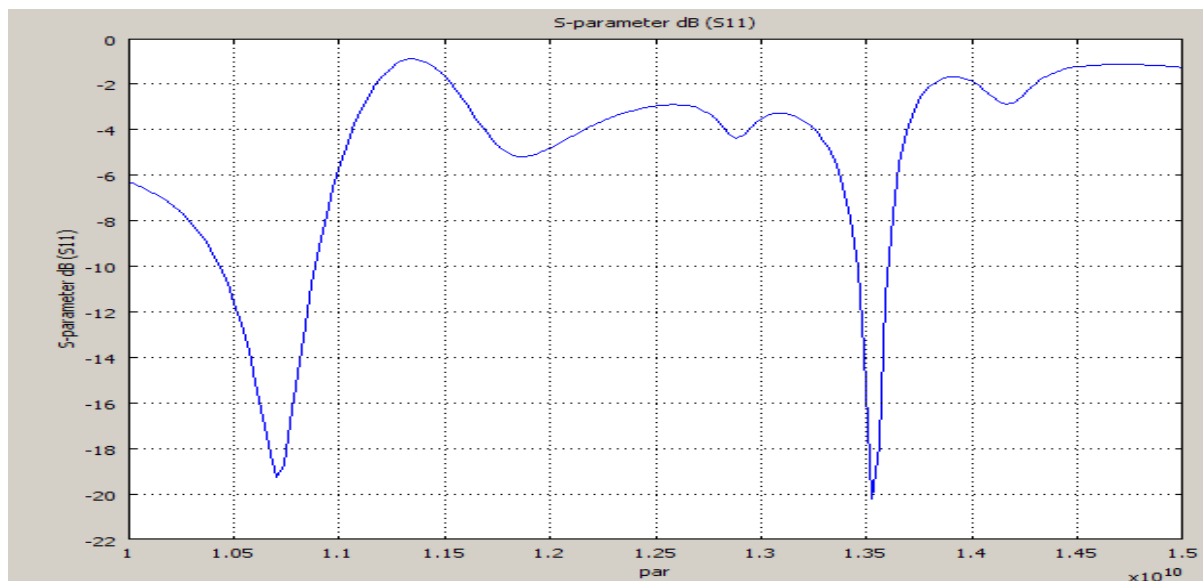
V této kapitole se budeme zabývat třírozměrnou buňkou meta-materiálu, tato buňka bude mít oproti předchozí buňce upravenou šířku dielektrické vrstvy na 1,54mm, abychom mohli simulovat tuto buňku na substrátu ARLON CuClad 217. Ostatní rozměry byly zachovány. Tyto rozměry jsou uvedeny na obr. 3.1. Okrajové podmínky nastaví stejně jako v kapitole 4.2. Na obr. 4.10 je zobrazen tvar této buňky.



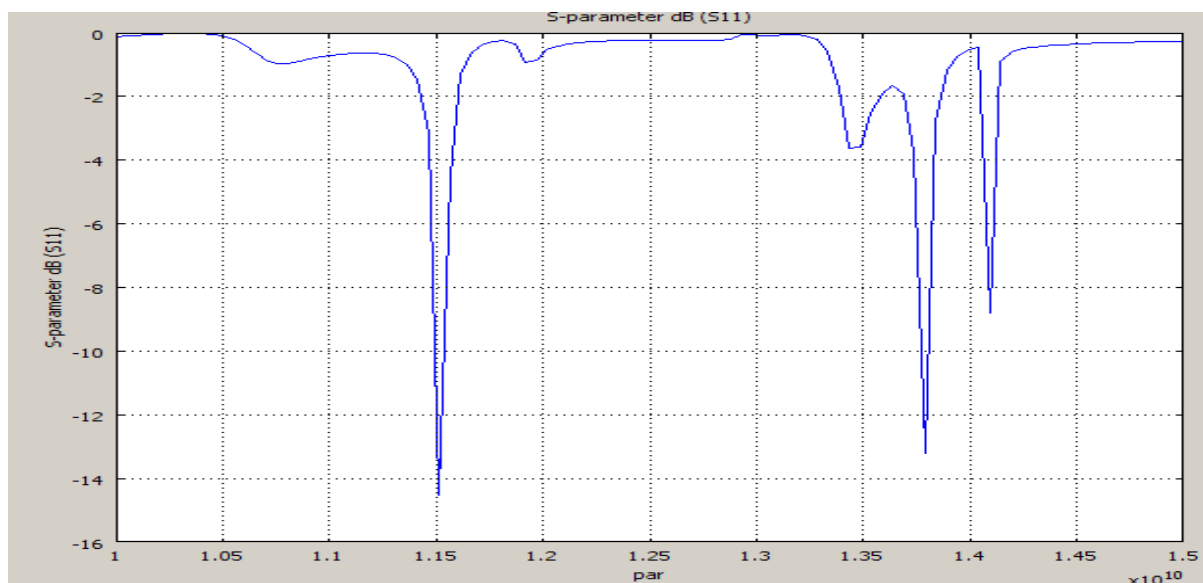
Obr. 4.10: 3D model buňky meta-materiálu s šířkou 1.54.

První simulace této buňky je zobrazena na obr. 4.11. Jsou na něm vidět dvě rezonanční frekvence. Jedna je na $f = 10,7$ GHz s hodnotou parametru $s_{11} = 19$ dB a druhá na frekvenci 13,5GHz s hodnotou parametru $s_{11} = 20$ dB.

Při druhé simulaci byla vedle první přidána ještě jedna buňka s totožnými rozměry. Tyto buňky jsou od sebe vzdáleny na šířku dielektrické vrstvy substrátu ARLON CuClad 217 (1.54mm). Výsledek simulace je zobrazen na obr. 4.12. Je na něm vidět, jak přidáním druhé buňky se první rezonanční frekvence posunula na hodnotu 11,5GHz s činitelem odrazu $s_{11} = 14$ dB, druhá na frekvenci $f = 13,7$ GHz a činitelem odrazu $s_{11} = 13$ dB.



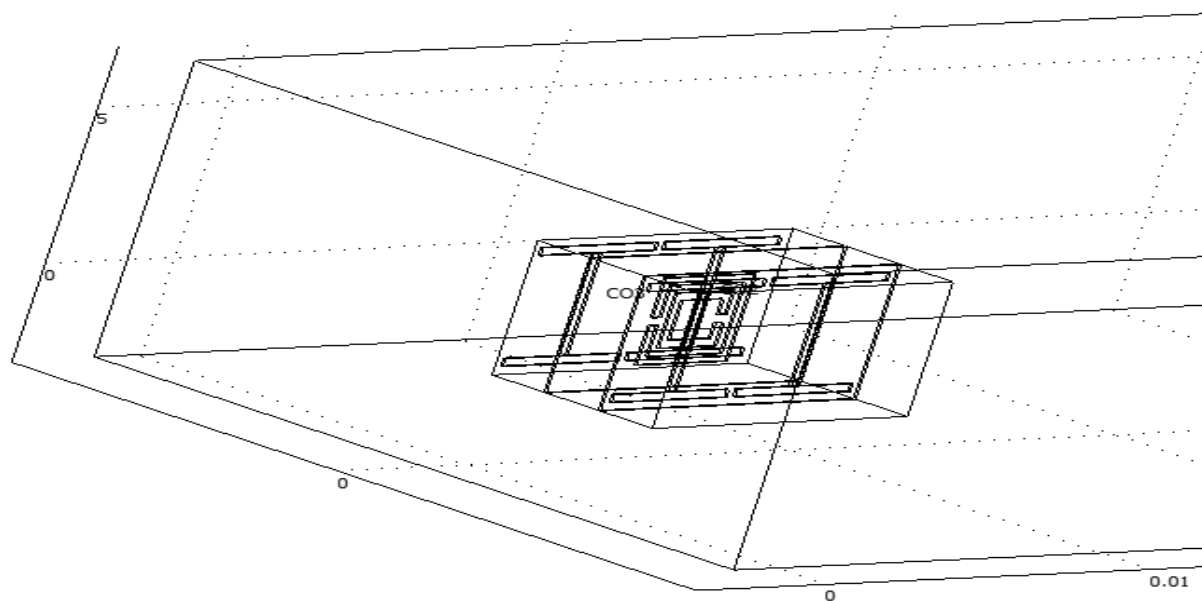
Obr. 4.11: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku.



Obr. 4.12: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky.

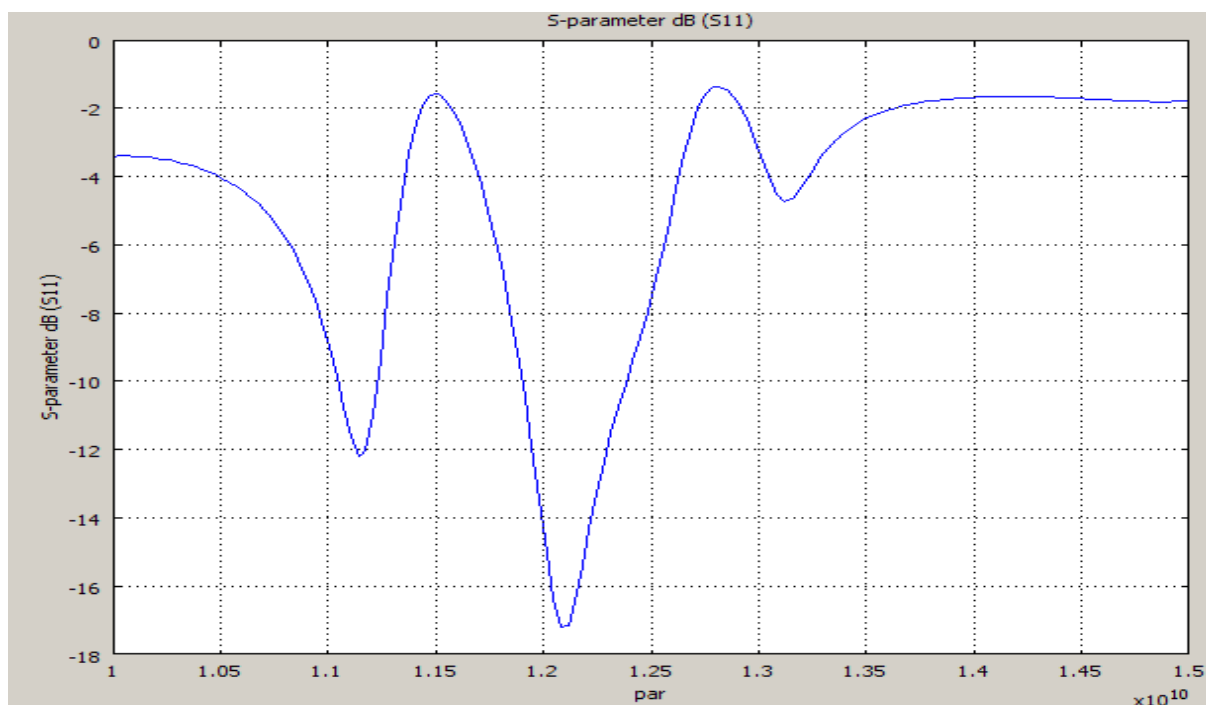
4.5 Analýzy buňky s permitivitou $\epsilon_r = 2,17$

Abychom mohli provést tuto analýzu, vezmeme rozměry a nastavení podmínek z předchozí kapitoly 4.4. Tuto buňku ovšem musíme doplnit o tři kvádry. U těchto kvádrů nastavíme okrajové podmínky v menu *Physic*→*Boundary Settings* dále v listboxu vybere jednotlivé strany těchto kvádrů a nastavíme je pomocí *Boundary Condition* na *Continuity*. Dále těmto kvádrům nastavíme v menu *Physic*→*Subdomain Settings* v listboxu, označíme tyto kvádry a v záložce *Physics* a do kolonky ϵ_r (*Relative permittivity*) napíšeme naši požadovanou hodnotu 2,17. Takto nakreslená buňka je zobrazena na obr. 4.13.

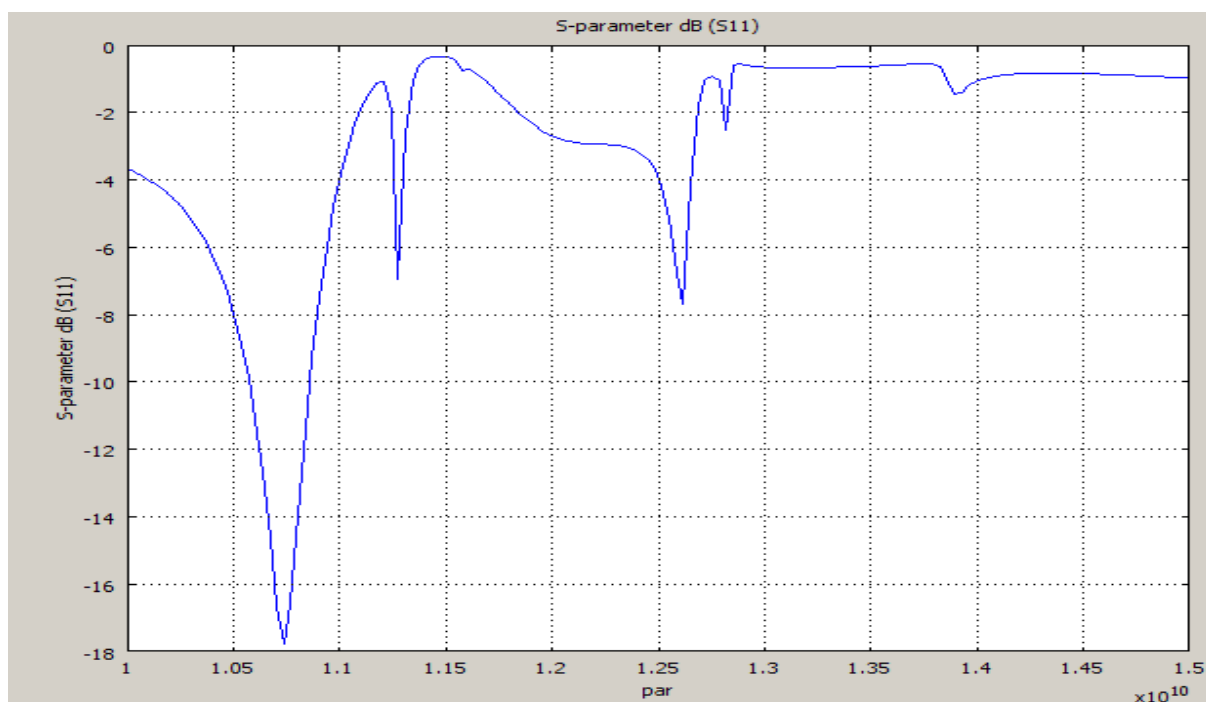


Obr. 4.13: 3D model buňky meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$.

Takto realizovanou buňku jsme analyzovali při stejném nastavení jako u předchozích simulací. Výsledek této simulace je na obr. 4.14. Na tomto grafu je vidět vliv přidaného substrátu o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$. Obr. 4.15 znázorňuje chování dvou buněk s dielektrickou vrstvou umístěných vedle sebe. Na grafu vidíme rezonanční frekvenci, která je na okolo 10,7 GHz s činitelem odrazu $S_{11} = 18$ dB. Přidáním druhé buňky bylo docíleno jedné rezonanční frekvence. Na rozdíl od jedné buňky, která dosáhla dvou vrcholů kolem frekvence 11GHz a 12GHz.



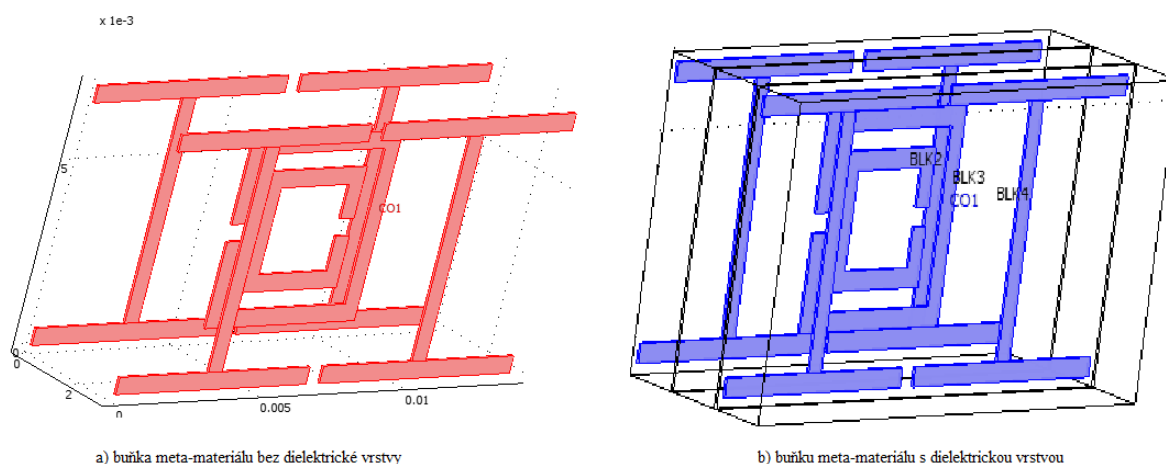
Obr. 4.14: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro buňku meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$.



Obr. 4.15: Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} pro dvě buňky meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$.

5 Přizpůsobení buňky meta-materiálu

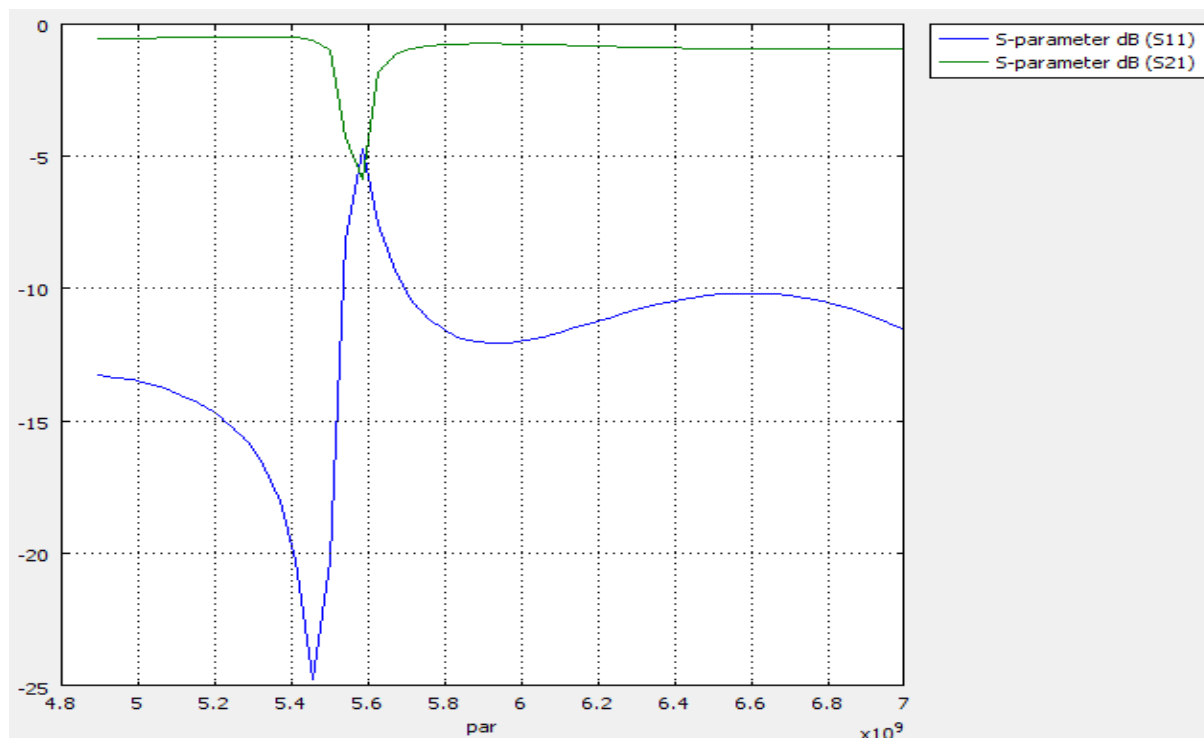
Nyní u naší buňky budeme měnit rozměry tak, abychom dosáhli požadované frekvence 5.9GHz. Na obrázku číslo 3.1 jsou zobrazeny původní rozměry buňky, tyto rozměry budeme v dalších simulacích měnit tak, abychom se co nejvíce přiblížili požadované frekvenci. Pro simulaci s jinými rozměry jsme použili opět program COMSOL Multiphysics. Všechny níže uvedené simulace byly nastaveny stejně jako předchozí jednotlivé kroky nastavení, které jsou popsány v kapitole 4.2. Jediný rozdíl je v použitém vlnovodu. Namísto původního vlnovodu WR-75 (9,5mm x 19mm) jsme použili pro další simulace vlnovod R58(40.0mm x 20.0) s pracovním rozsahem od 4.9GHz do 7.05GHz. Rozměry buňky jsme získali tak, že jsme si zvolili tloušťku čáry a zbylé rozměry jsme dopočítali v poměru k původní tloušťce čáry, jak je zmíněno v kapitole 3.2. Na obrázku 5.1 je zobrazena buňka meta-materiálu bez dielektrické vrstvy (substrátu) a s dielektrickou vrstvou.



Obr. 5.1: Ukázka buňky meta-materiálu bez dielektrické vrstvy a s dielektrickou vrstvou.

5.1 Analýza buňky s šířkou čar 0.381mm

Jako první jsme simulovali buňku o následujících rozměrech. Šířka všech mezer a čar je 0.381mm, $d_1 = 11.049\text{mm}$, $d_2 = 2.944\text{mm}$, $d_3 = 6.477\text{mm}$, $l_1 = 5.715\text{mm}$, $l_2 = 2.667\text{mm}$, $l_3 = 5.334\text{mm}$, $r_1 = 4.191\text{mm}$, $r_2 = 2.667\text{mm}$ jedná se o 1.5 násobek původních rozměrů buňky. Šířka mezi jednotlivými znaky je 1,54mm, což je šířka dielektrické vrstvy na substrátu ARLON CuClad 217, pro který tuto buňku meta-materiálu přizpůsobujeme. Buňku s těmito rozměry jsme nakreslili v programu COMSOL Multiphysicsa a provedli jsme jednu simulaci s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$ (obr. 5.1).

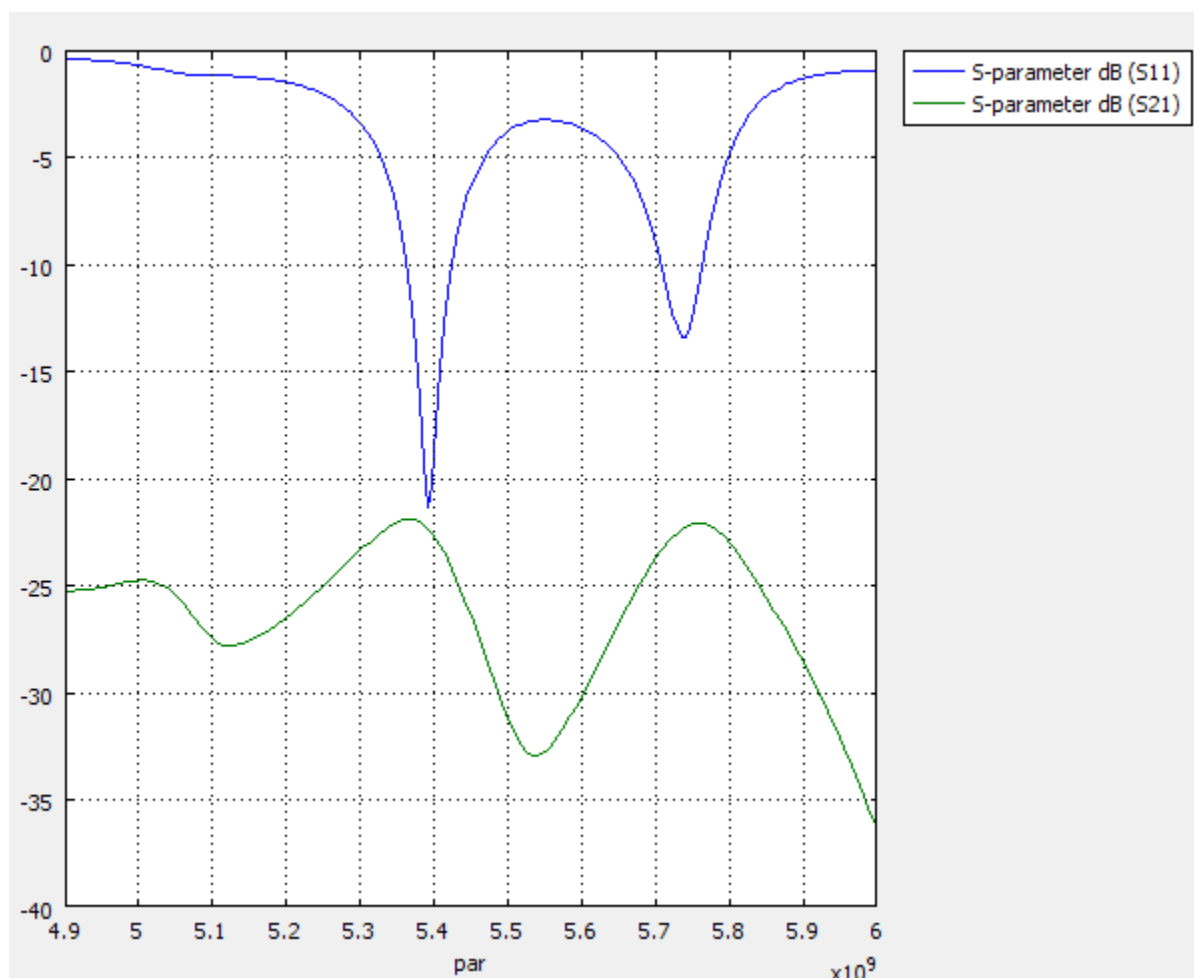


Obr. 5.2: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu (s šířkou čar 0.381mm).

Na obrázku obr. 5.1 je zobrazen výsledek simulace, je zde také vyobrazena frekvenční závislost parametru s_{11} a s_{21} . Z této simulace je vidět, že námi upravené rozměry buňky nejsou vhodné pro použití jako kryt antény, neboť podle výsledku simulace se nám tato buňka chová jako pásmová zadrž se zadržným pásmem okolo 5,6GHz a parametr $s_{11} = 25\text{dB}$ při frekvenci 5,45GHz.

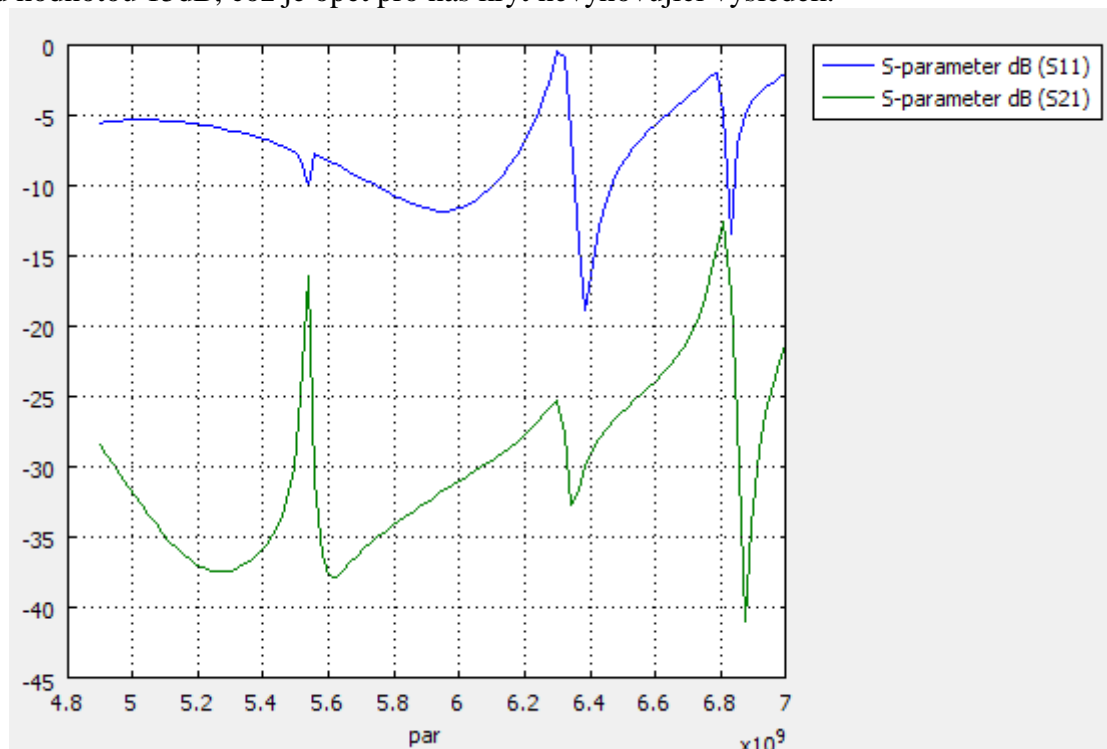
5.2 Analýza buňky s šířkou čar 0.508mm

Po neúspěchu s prvními rozměry buňky jsme zvolili nové rozměry buňky. Šířka všech mezer a čar je 0,508mm, $d_1 = 14,732\text{mm}$, $d_2 = 3,888\text{mm}$, $d_3 = 8,636\text{mm}$, $l_1 = 7,62\text{mm}$, $l_2 = 3,556\text{mm}$, $l_3 = 7,112\text{mm}$, $r_1 = 5,588\text{mm}$, $r_2 = 3,556\text{mm}$ tyto rozměry jsou dvojnásobkem rozměru původní buňky. Buňku s novými rozměry jsme nakreslili a simulovali. Výsledek simulace je na obrázku 5.2. Tato buňka byla simulována bez dielektrické vrstvy. Na obr. 5.2 je vidět parametr s_{11} , který je největší při frekvenci $f = 5,4\text{GHz}$ (parametr $s_{11} = 20\text{dB}$), což odpovídá našim požadavkům. Ovšem parametr s_{21} , který je pro celý frekvenční rozsah roven 25dB, je pro náš kryt nevyhovující, neboť se chová jako zadrž v celém rozsahu.



Obr. 5.3: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika (s šířkou čar 0.508mm).

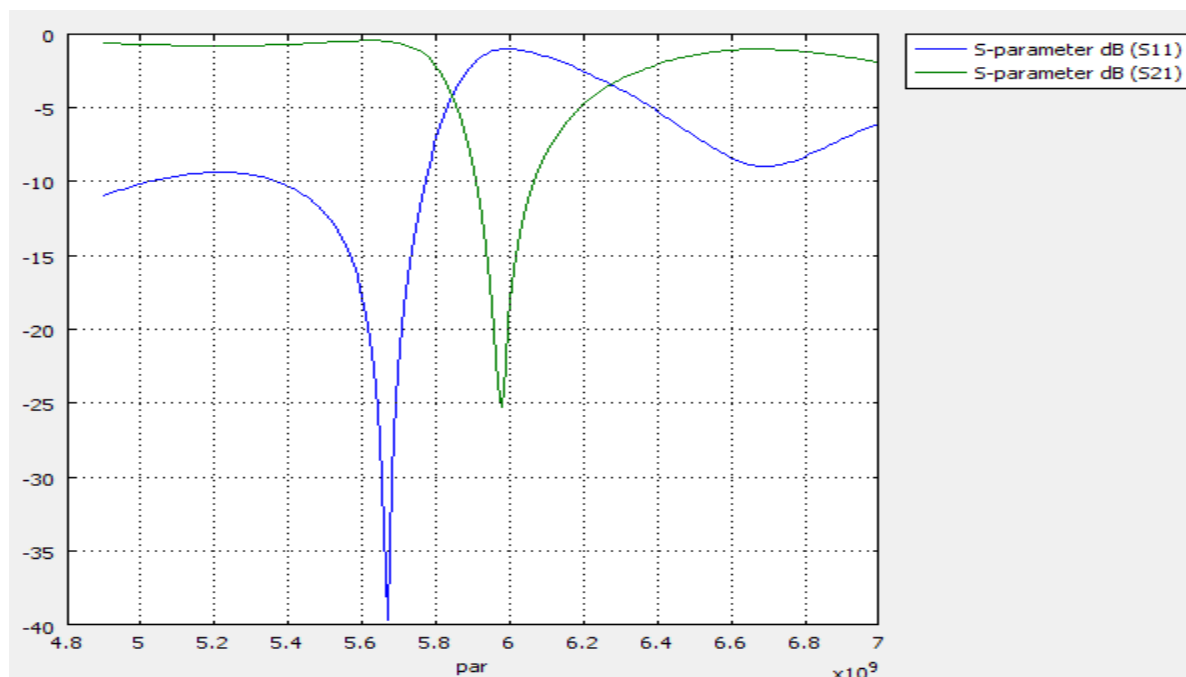
V druhé simulaci s těmito rozměry jsme přidali dielektrickou vrstvu o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$. Výsledek simulace s dielektrikem je znázorněn na obr. 5.3. Po přidání dielektrické vrstvy se nám výrazně zhorší činitel odrazu (parametr s_{11}). Parametr s_{21} byl po celý frekvenční rozsah pod hodnotou 15dB, což je opět pro náš kryt nevyhovující výsledek.



Obr. 5.4: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.508mm).

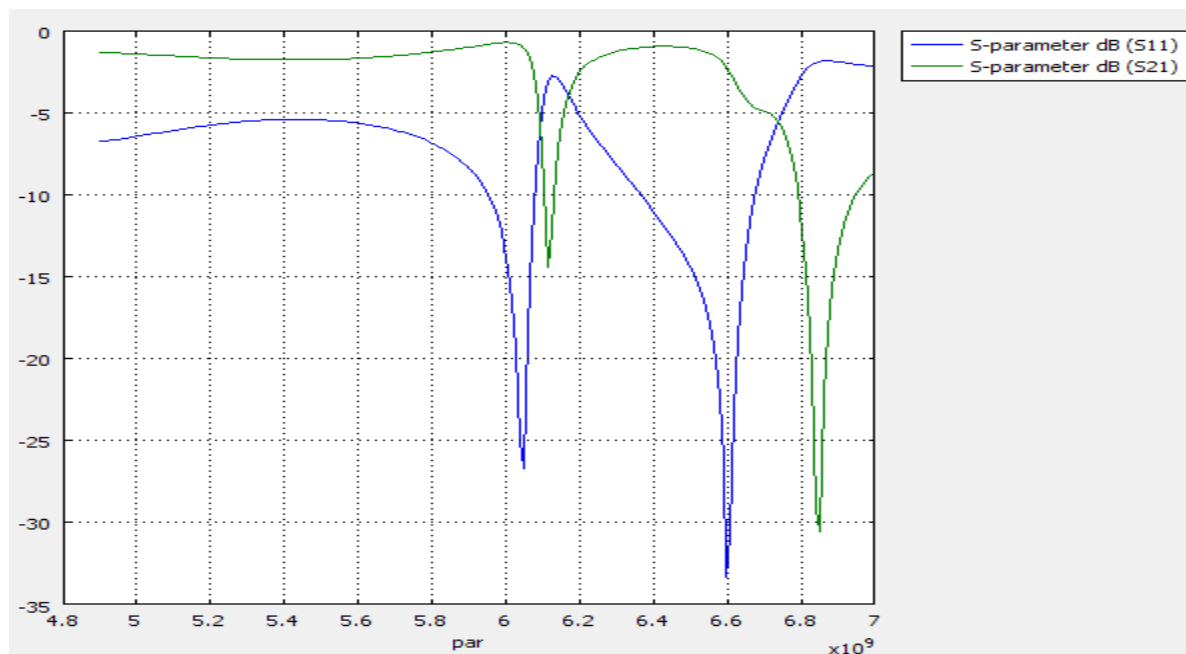
5.3 Analýza buňky s šířkou čar 0.513mm

V pořadí třetí buňka, kterou jsme simulovali, měla následující rozměry. Šířka mezer a čar je 0,513mm, $d_1 = 14,879\text{mm}$, $d_2 = 3,927\text{mm}$, $d_3 = 8,722\text{mm}$, $l_1 = 7,696\text{mm}$, $l_2 = 3,592\text{mm}$, $l_3 = 7,183\text{mm}$, $r_1 = 5,644\text{mm}$, $r_2 = 3,592\text{mm}$. Buňka s těmito rozměry se blížila k požadovaným hodnotám. Na obrázku 5.4 a obrázku 5.5 jsou zobrazeny výsledky frekvenčních závislostí parametru s_{11} a parametru s_{21} . První simulaci jsme provedli bez dielektrické vrstvy. Jak je vidět na obrázku 5.4, tak při frekvenci 5.65GHz je parametr s_{11} roven 40dB a parametr s_{21} se blíží k nule. Tyto naměřené hodnoty by odpovídaly našim požadavkům, ale tato buňka nebyla simulována na reálném substrátu. Simulace se substrátem je na obrázku 5.5.



Obr. 5.5: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika (s šířkou čar 0.513mm).

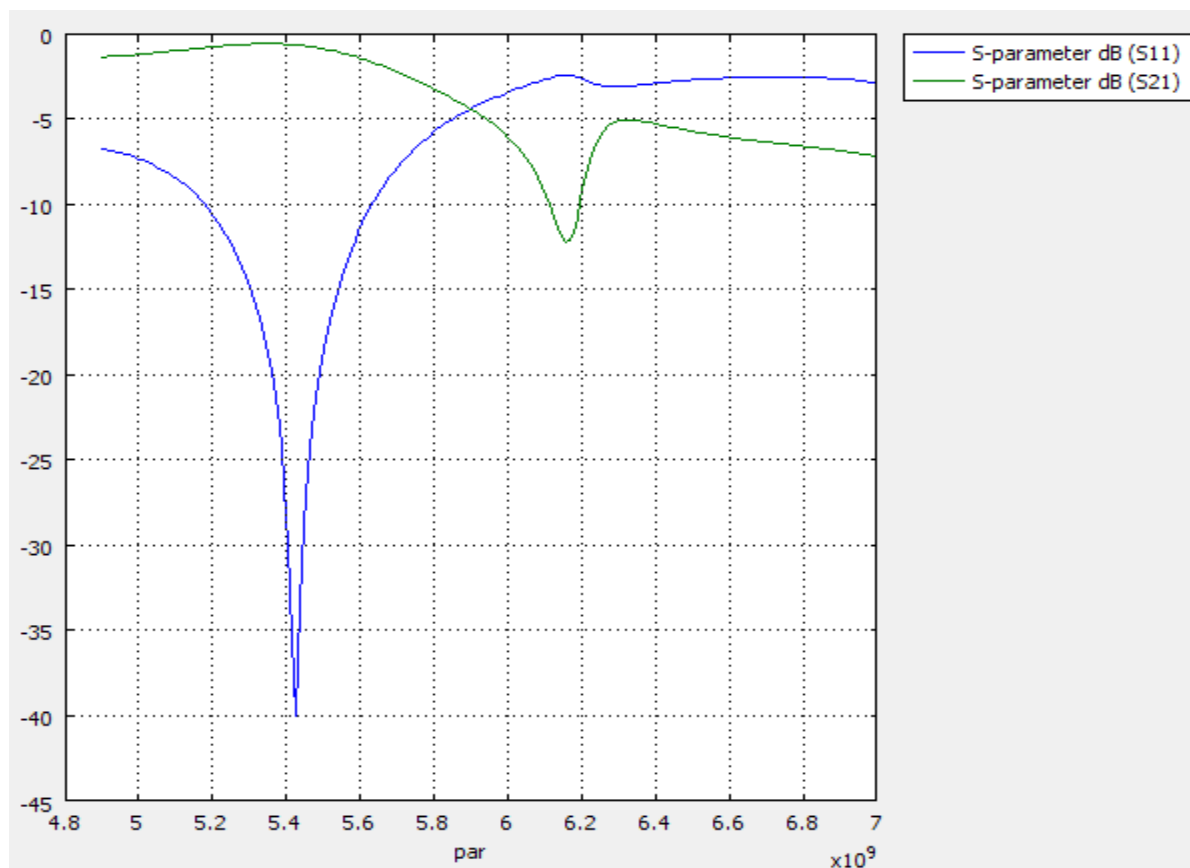
Na obrázku 5.5 je frekvenční závislost S-parametru jedné buňky meta-materiálu s dielektrickou vrstvou o permitivitě substrátu $\epsilon_r = 2,17$. Oproti buňce bez substrátu se nám vytvořily dva laloky. První na frekvenci 6.05GHz s parametrem $s_{11} = 26$ dB a parametrem s_{21} , který se blíží nule a druhý na frekvenci 6,6GHz s hodnotou parametru $s_{11} = 33$ dB a parametrem $s_{21} = 2$ dB. I po přidání dielektrické vrstvy má buňka meta-materiálu přijatelné vlastnosti pro náš kryt.



Obr. 5.6: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.513mm).

5.4 Analýza buňky s Šířkou čar 0.4699mm

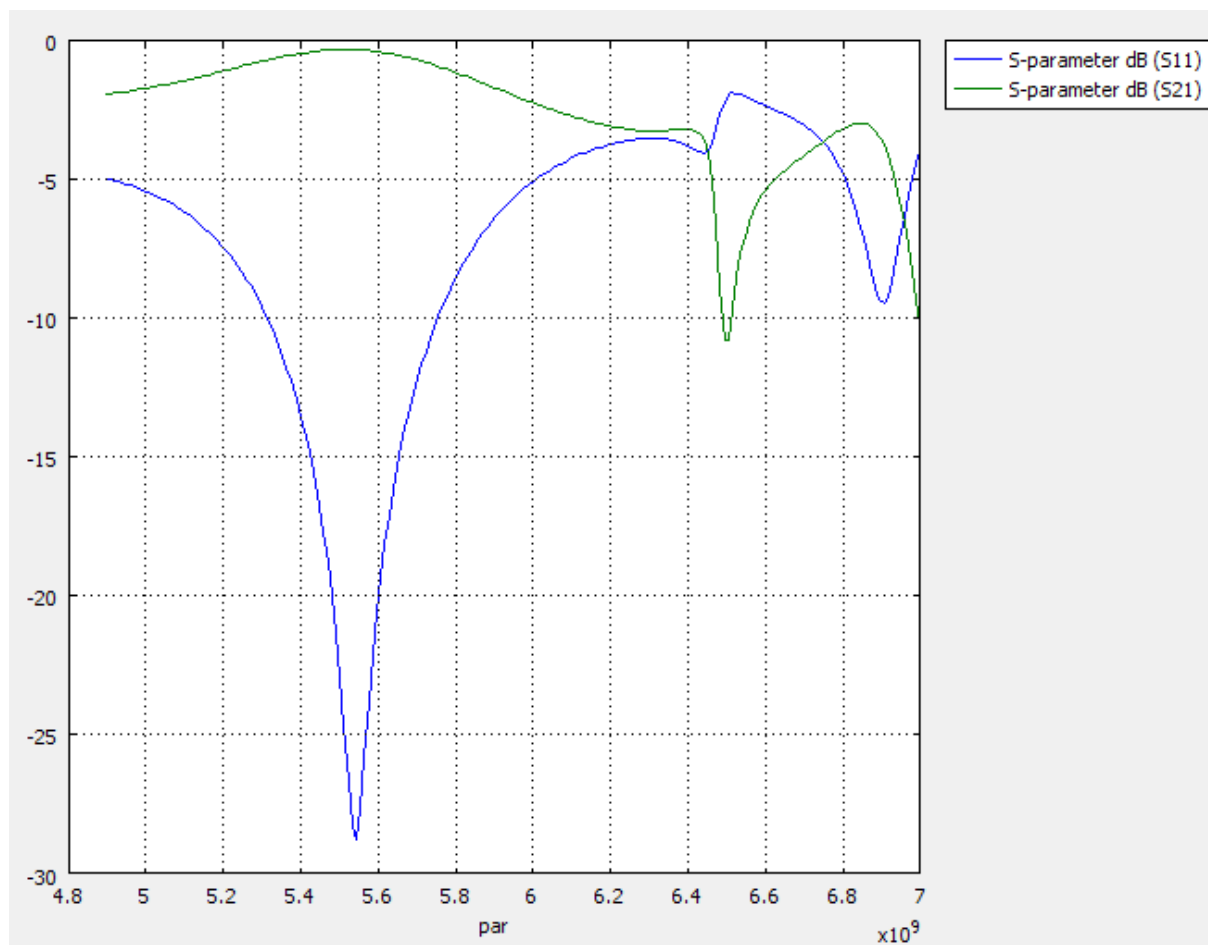
Poslední rozměry buňky, u kterých jsme provedli frekvenční analýzy, mají následující hodnoty. Šířky mezer a čar jsou 0,4699mm, $d_1 = 13,627\text{mm}$, $d_2 = 3,596\text{mm}$, $d_3 = 7,988\text{mm}$, $l_1 = 7,049\text{mm}$, $l_2 = 3,289\text{mm}$, $l_3 = 6,579\text{mm}$, $r_1 = 5,169\text{mm}$, $r_2 = 3,289\text{mm}$. S těmito rozměry buňky a bez dielektrické vrstvy jsme dosáhli hodnoty parametru $s_{11} = 40\text{dB}$. Parametr s_{21} se blíží k nule pro frekvenci 5.4GHz jak je znázorněno na obrázku 5.7.



Obr. 5.7: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu bez dielektrika (s šířkou čar 0.4699mm).

Na obrázku 5.8 je zobrazen výsledek simulace s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$. Po přidání dielektrické vrstvy se nám rezonance posunula na frekvenci 5,55GHz. Při této frekvenci se nám lehce zhoršil parametr s_{11} , který má hodnotu 28dB a parametr s_{21} se stále blíží k nule.

Ze všech výše uvedených rozměrů buněk a jejich simulací nám nejvíce vyhovují rozměry použité v této kapitole, se kterými jsme dosáhli nejvhodnějšího výsledku pro náš kryt z meta-materiálu.



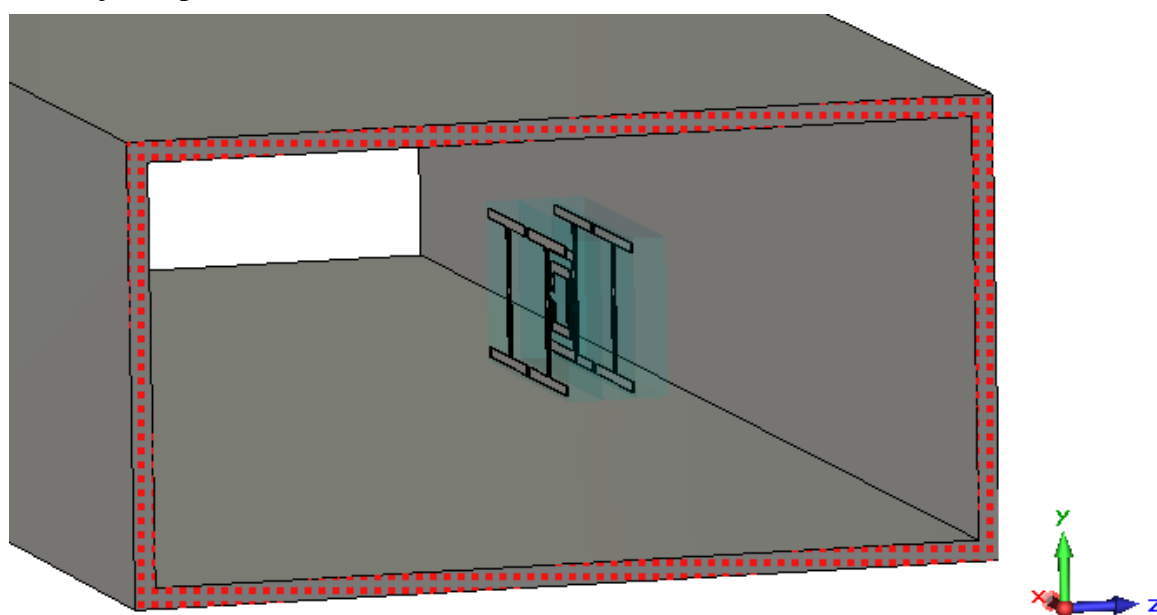
Obr. 5.8: Frekvenční závislost S-parametru buňky meta-materiálu s dielektrikem (s šířkou čar 0.4699mm).

6 Ověření Analýza buněk

K ověření výsledku z programu COMSOL Multiphysics jsme zvolili CST Microwave Studio. Výhodou tohoto programu je rychlost výpočtu, který je několikrát rychlejší oproti COMSOL Multiphysics a také má mnohem menší nároky na hardware. Hlavní výhodou pro nás byla možnost zakomponování proměnné do rozměru buňky. Díky této vlastnosti jsme mohli změnou hodnoty této proměnné změnit všechny rozměry buňky a nemuseli ji kreslit znovu, tak jak tomu bylo v COMSOL Multiphysics.

6.1 Nastavení CST Microwave Studio

Po spuštění CST DESIGN ENVIRONMENT jsme z dané nabídky Create new a project (vytvoření nového projektu) zvolili šablonu *Antenna (Horn, Waveguide)*. Po zobrazení grafického rozhraní CST jsme nakreslili naši 3D buňku a umístili ji do vlnovodu tak jak je to zobrazeno na obrázku 6.1. Do rozměrů buňky jsme zadefinovali proměnnou x abychom mohli změnou hodnoty této proměnné měnit všechny rozměry. Po nakreslení této buňky s dielektrickou vrstvou jsme nadefinovali vlastnosti použitých materiálů, dielektrické vrstvě permitivitu $\epsilon_r = 2,17$ a zbytek struktury jsme nastavil na PEC (Perfekt Electric Conductor). U takto nastvané buňky jsme provedli jednotlivé simulace. Výsledky simulací jsou popsány v následující kapitole 6.2.

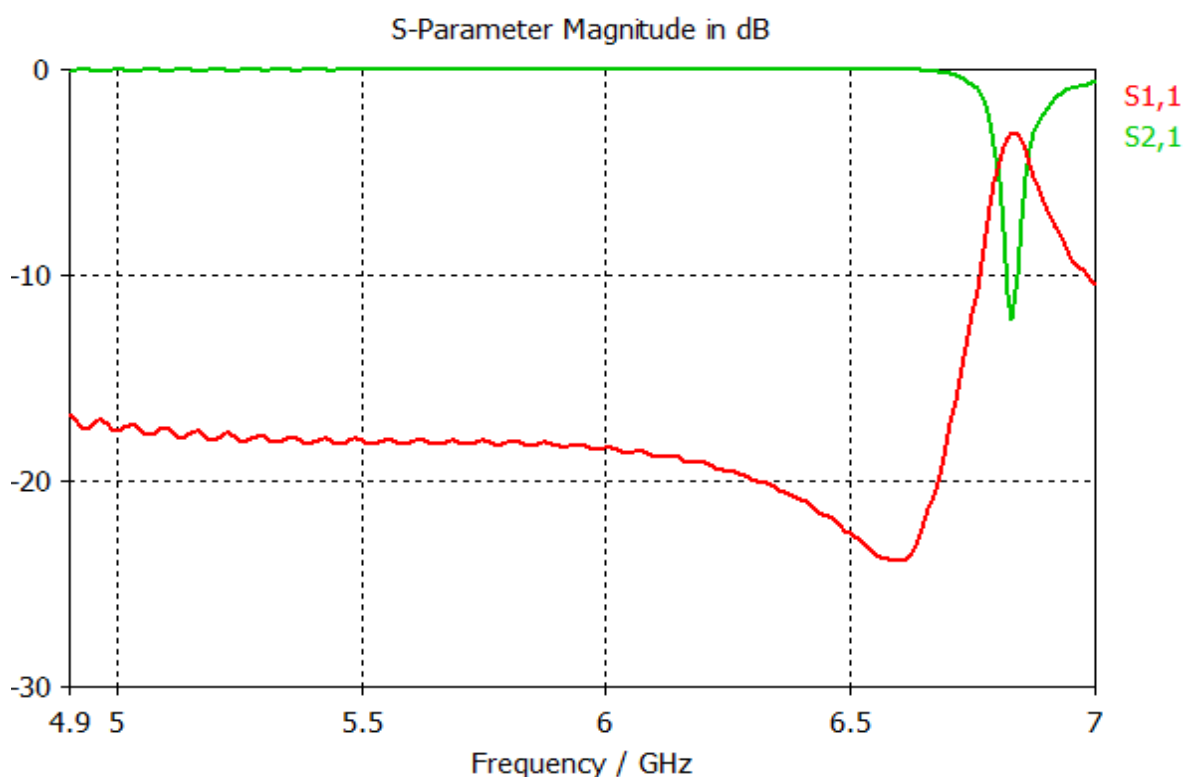


Obr. 6.1: Buňka meta-materiálu ve vlnovodu v programu CST Microwave Studio.

6.2 Výsledky simulací v CST Microwave Studio a porovnání s COMSOL Multiphysics

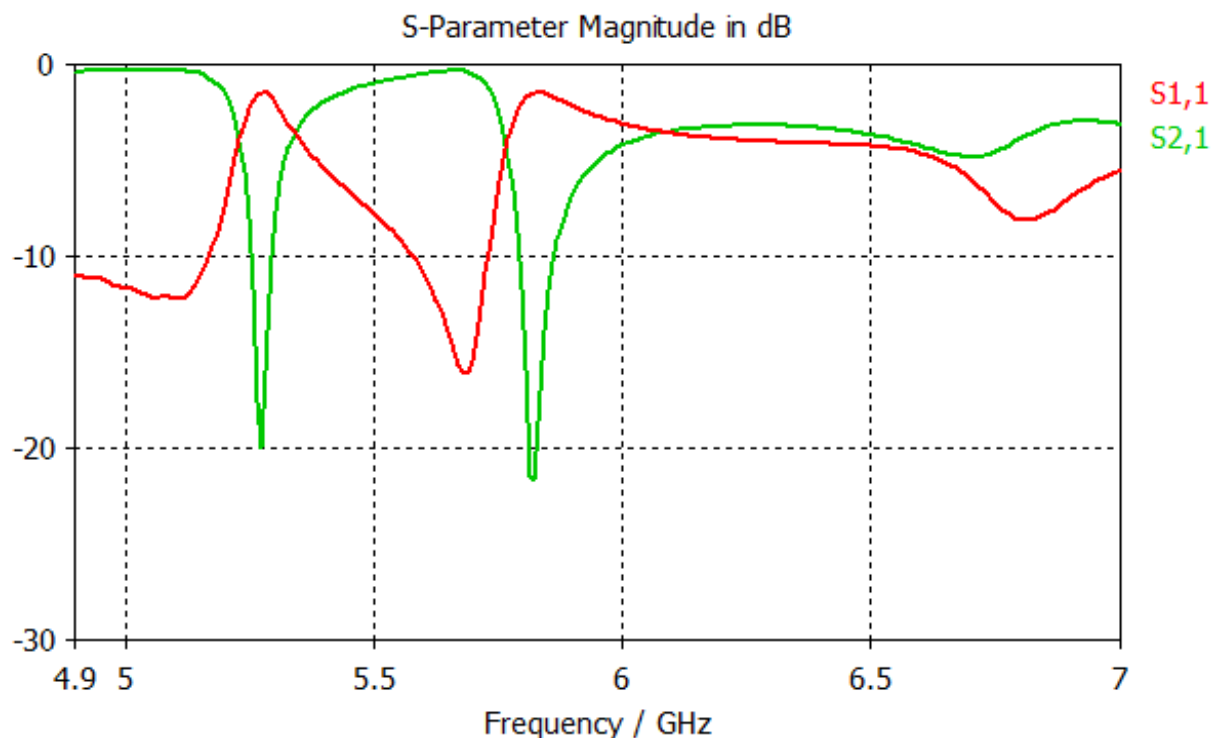
V této kapitole jsou zobrazeny jednotlivé výsledky simulací buněk meta-materiálu, které jsme provedli v programu CST Microwave Studio. Jednotlivé rozměry buněk byli převzaty z předchozích kapitol 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4.

V první simulaci byli použity rozměry z kapitoli 5.1, výsledek je zobrazen na obrázku 6.2. průběh frekvenční závislost s-parametru se velmi podobá výsledku z COMSOLu viz Obr.5.2 s tím rozdílem, že jednotlivé laloky s-parametrů nastali při vyšších frekvencích. Parametr s_{21} se nám také chová, jako pásmová zadrž na frekvenci 6,75GHz a parametr s_{11} je po celém frekvenčním rozsahu pod hodnotou 17dB, ale kolem frekvence 6.6GHz začne jeho hodnota růst až k 4dB. Stejně jako v COMSOLu jsou i v CST pro nás tyto rozměry buňky nepoužitelné.

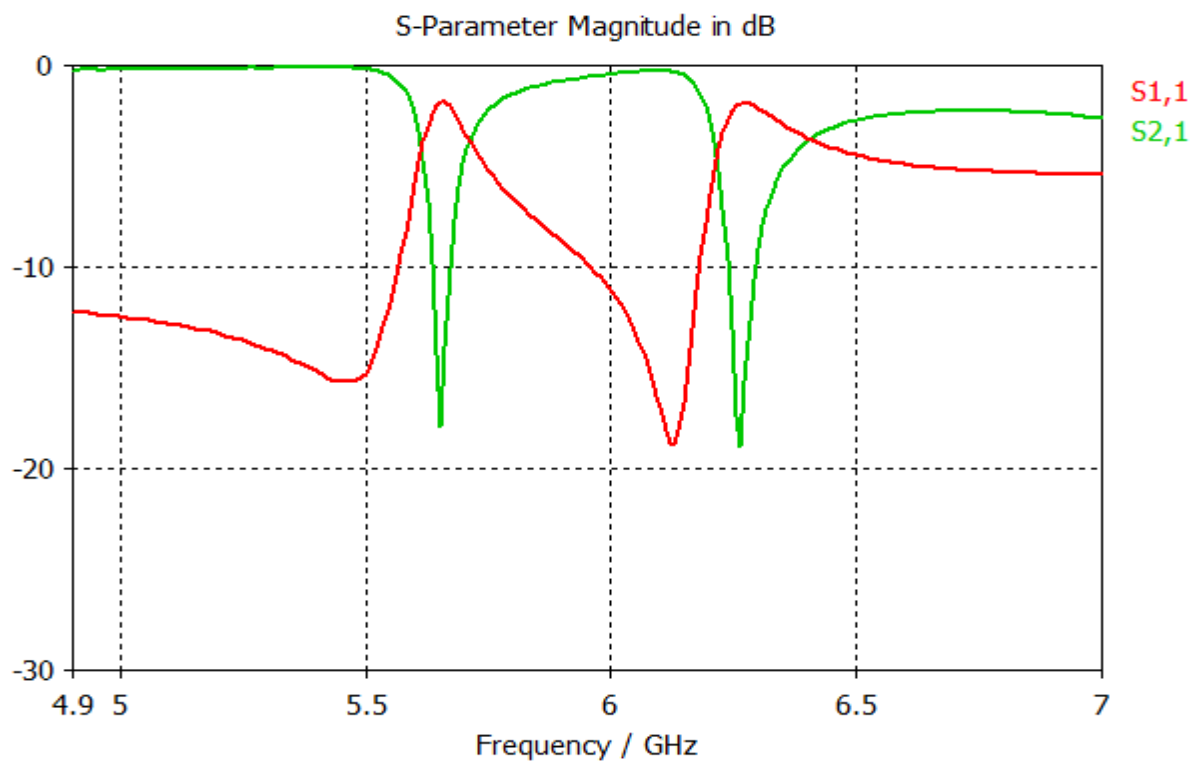


Obr. 6.2: Simulace buňky v CST s rozměry z kapitoly 5.1.

V druhé a třetí simulaci jsme použili rozměry z kapitol 5.2 a 5.3. Výsledek simulace pro rozměry z kapitoly 5.2 je zobrazena na obrázku 6.3 a pro rozměry z kapitoly 5.3 jsou výsledky zobrazeny na obrázku 6.4. Na těchto dvou obrázcích 6.3 a 6.4 je vidět, že zobrazené průběhy jsou téměř totožné jen jsou frekvenčně posunuté. I s-parametry dosahují přibližně stejných hodnot. Při srovnání výsledku z COMSOLu se nám simulace při rozměrech z kapitoly 5.2 velice liší, ale při srovnání simulace na obrázku 5.6 a 6.3 jsou výsledky podobné i frekvence s-parametrů odpovídají i přesto že na obrázku 5.6 jsou rozměry z kapitoly 5.3. Při simulaci rozměrů z kapitoly 5.3 jsou průběhy parametru s_{21} z obou programů velmi podobné, i průběh parametru s_{11} jen s CST byla nejlepší hodnota dosažena při frekvenci 5.7GHz s hodnotou s_{11} =15dB a v COMSOLu při frekvenci 6,6GHz s hodnotou s_{11} =33dB.

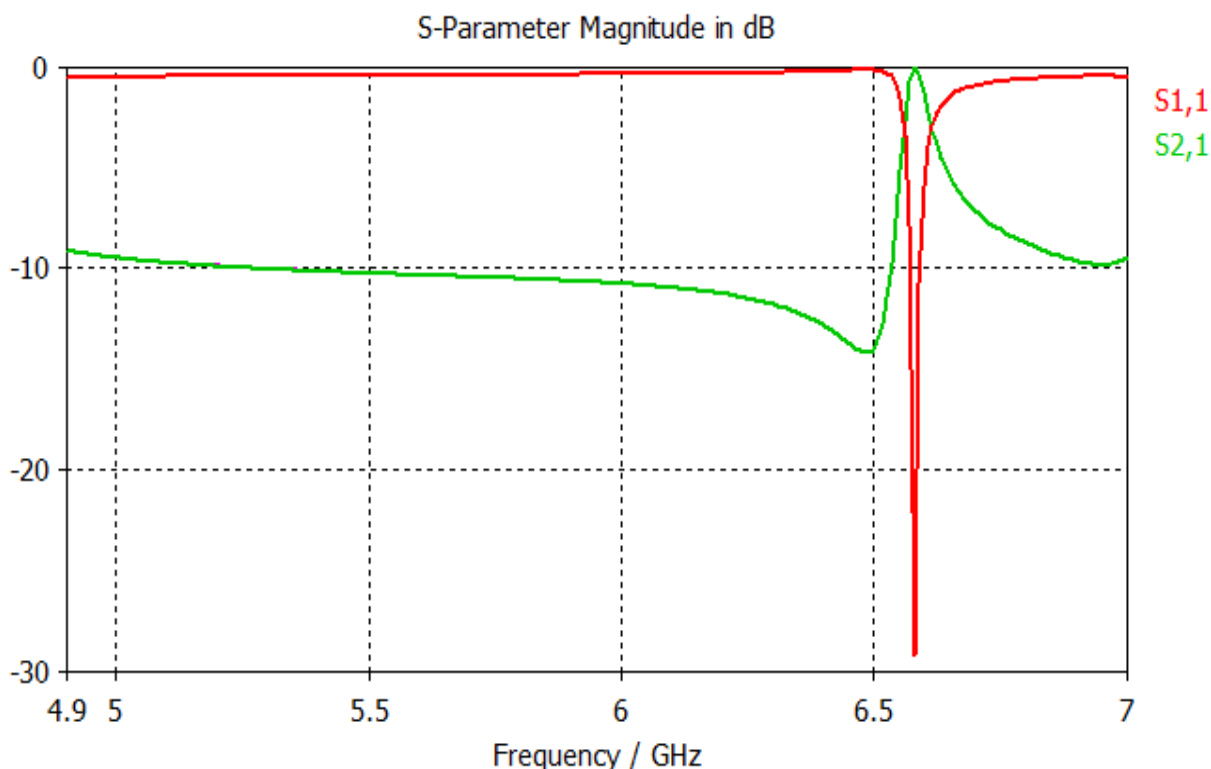


Obr. 6.3 Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoly 5.2.



Obr. 6.4: Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoly 5.3.

V poslední simulaci jsme použili rozměry z kapitoly 5.4. Výsledek simulace je zobrazen níže na obrázku 6.5 z tohoto grafu vidíme, že při frekvenci 6.6GHz je parametr s_{11} =29dB a parametr s_{21} se blíží k nule. Při porovnání výsledku z COMSOLu kdy při frekvenci 5,55GHz měl parametr s_{11} hodnotu 28dB, parametr s_{21} se blíží k nule a šířka pásma kdy byl parametr s_{11} = 15dB je od 5.45GHz do 5,65GHz je výsledek z CST frekvenčně posunut o 1.05GHz a šířka pásma při hodnotě parametr s_{11} = 15dB je velmi malá.



Obr. 6.5: Frekvenční závislost S-parametru pro rozměry z kapitoli 5.4.

Výsledky z programů CST Microwave Studio a COMSOL Multiphysics hlavně ve frekvencích kdy výsledky byli o určitou frekvenci posunuty, nebo i v celkovém výsledku. Důvod těchto rozdílů mohl být způsoben rozdílnou metodou výpočtu obou programů. COMSOL Multiphysics počítá pomocí Metody konečných prvků a CST Microwave Studio své výpočty provádí Metodou konečných diferencí v časové oblasti.

7. Závěr

V první části tohoto semestrálního projektu jsme se zabývali Meta-materiály samotnými a jejich využitím viz. Kapitola 2. Dále jsme stručně popsali článek [1] viz kapitola 3, ze kterého dále vycházela naše práce. Z tohoto článku pro nás byli nejdůležitější rozměry a tvary buňky Meta-materiálu.

V další kapitole 4 jsme se zabývali simulacemi této buňky. Prvně v 2D zobrazení, což je popsáno v podkapitole 4.1. v tomto dvourozměrném zobrazení bylo dosaženo nejvyšší hodnoty parametru $s_{11} = 20$ dB kolem frekvence 13,5GHz, tato hodnota se oproti teoreticky poněkud liší, neboť největší hodnota měla být kolem 11GHz. Od podkapitoly 4.2 jsme se zabývali už jen 3D buňkou meta-materiálu a různým skládáním jejich počtu. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při simulaci dvou buněk, kdy činitel odrazu dosáhl hodnoty 12dB kolem frekvence 10GHz.

Podkapitoly 4.4 a 4.5 jsou pro nás nejdůležitější, neboť z těchto kapitol se bude odvíjet další část bakalářské práce. V těchto kapitolách je simulována buňka z pozměněnou vzdáleností mezi jednotlivými obrazci. Tato vzdálenost byla zvětšena z původních 0.254mm na 1.54mm, důvodem této změny je změna substrátu na ARLON CuClad 217. Byly provedeny dva typy analýz, první bez dielektrické vrstvy viz podkapitola 4.4 a druhá s dielektrickou vrstvou o permitivitě $\epsilon_r = 2,17$. Pro nás nejpříjemnějšího výsledku bylo dosaženo při simulaci dvou buněk s dielektrikou, kdy bylo dosaženo hodnoty činitele odrazu $s_{11} = 18$ dB při frekvenci 10.7GHz.

V kapitole 5 jsme se zabývali simulacemi buněk s různými rozměry. Jednotlivé simulace a rozměry buněk jsou popsány v podkapitolách 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4. Mi jsme z těchto simulací vybrali nám nejvíce vyhovující buňku meta-materiálu, což byla buňka z podkapitoly 5.4, která dosahovala pro nás nejlepší hodnoty s parametru. Parametr $s_{11} = 28$ dB frekvencí 5,55GHz a parametr s_{21} se blíží k nule.

V Následující kapitole 6 jsme za pomoci programu CST Microwave Studio ověřili výsledky simulací z podkapitol 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4, které byly provedeny v programu COMSOL Multiphysics. Výsledky jednotlivých simulací jsou popsány v podkapitole 6.2, kde jsme popsali a porovnali s výsledky z COMSOLu. Nejdůležitější porovnání pro nás byl výsledek z obrázku 6.5, na kterém je zobrazen výsledek simulace z CST s rozměry z podkapitoly 5.4 v porovnání s obrázkem 5.8. I přes rozdíly v simulacích jsme potvrdili, že rozměry použité v kapitole 5.4 mají vhodný rozměr, neboť v obou programech jsme dosáhli dobrých hodnot s-parametru s tím rozdílem, že v COMSOL Multiphysics nastala rezonance při frekvenci 5,55GHz a v CST Microwave Studio nastala rezonance při frekvenci 6,6GHz. Pravděpodobný důvod rozdílných výsledků byl popsán v podkapitole 6.2.

Bohužel z časových důvodů jsme nestihli realizaci buněk meta-materiálu s rozměry z podkapitoly 5.4 a proto nebylo provedeno ani experimentální ověření této skupiny buněk.

Literatura

- [1] Resonant Meta-Surface Superstrate for Single and Multifrequency Dipole Antenna Arrays
- [2] RAIDA, Z. Počítačové řešení komunikačních systémů, Skripta FEKT VUT, Brno:Brno:Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004
- [3] HOHN, T. Modelování kmitočtově selektivních povrchů. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008
- [4] www.aldebaram.cz/bulletin/2006_16_met.php
- [5] www.multitel.be/newsletter/mn72005/article.php?art_id=17
- [6] www.cs.wikipedia.org/wiki/Metamateriál
- [7] RAIDA, Z. a kol. *Multimediální učebnice* [online]. Brno: Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně, 2008 - [cit. 4. května 2009]. Dostupné na WWW:
< <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php> >.
- [8] Simulation of a horn antenna, <<http://www.cst.com/Content/Showroom/Default.aspx>>